

LUCIANA DORNELLES VENQUIARUTO
(ORGANIZADORA)

**EXPRESSÕES
ACADÊMICAS
ENGENHARIA QUÍMICA**

2
0
2
5

EXPRESSÕES ACADÊMICAS 2025
ENGENHARIA QUÍMICA

LUCIANA DORNELLES VENQUIARUTO
(ORGANIZADORA)

EXPRESSÕES ACADÊMICAS 2025
ENGENHARIA QUÍMICA



ERECHIM-RS
2025

Todos os direitos reservados à EDIFAPES.

Proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma e por qualquer meio mecânico ou eletrônico, inclusive através de fotocópias e de gravações, sem a expressa permissão dos autores. Os dados e a completude das referências são de inteira e única responsabilidade dos autores.

Conselho Editorial:

Adilson Luíz Stankiewicz (URI / Erechim/RS) - Presidente

Arnaldo Nogaro (URI / Erechim/RS)

Cláudia Petry (UPF / Passo Fundo/RS)

Elcemina Lucia Balvedi Pagliosa (URI / Erechim/RS)

Elisabete Maria Zanin (URI /Erechim/RS)

Maria Elaine Trevisan (UFSM / Santa Maria/RS)

Jadir Camargo Lemos (UFSM / Santa Maria/RS)

Neila Tonin Agranionih (UFPR / Curitiba/PR)

Sérgio Bigolin (URI / Erechim/RS)

Yuri Tavares Rocha (USP / São Paulo/SP)

Revisão Linguística: Os autores.

E96 Expressões acadêmicas 2025: engenharia química [recurso eletrônico] / organização
Luciana Dornelles Venquiaruto. – Erechim, RS: EdiFAPES, 2025.
1recurso eletrônico

Modo de acesso: <http://www.uricer.edu.br/edifapes>

ISBN 978-65-88528-96-9

1. Tratamento de efluentes 2. Bebida artesanal 3. Vinhaça 4. Reciclagem química
I. Venquiaruto, Luciana Dornelles

C.D.U.: 66.0

Catálogo na fonte: bibliotecária Sandra Milbrath CRB 10/1278



EDIFAPES

Livraria e Editora
Erechim/RS

SUMÁRIO

TRATAMENTO DE EFLUENTE DE ABATEDOURO DE AVES COM MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO: UMA ABORDAGEM PARA REÚSO	7
Eduarda Campeol, Bianca Trindade Oldoni, Gabriela Mesquita Bruel, Andressa Boff, Clarice Steffens, Juliana Steffens	7
ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE CACHAÇAS ARTESANAIS PRODUZIDAS NA MICRORREGIÃO DE ERECHIM	32
Marcos Luis Morgan, Luciana Dornelles Venquiaruto	32
DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE HIDROMEL COM ADIÇÃO DE HIBÍSCO (<i>Hibiscus sabdariffa</i>).....	44
Luiz Antônio Teixeira Pedott, Lucas Nascimento, Jamile Zeni, Eunice Valduga	44
A VINHAÇA E SEUS MÚLTIPLOS USOS: UMA REVISÃO DE POTENCIALIDADES E DESAFIOS	60
Guilherme Antônio Mariga, Alexander Junges	60
MICROPLÁSTICOS EM FOCO: RECICLAGEM QUÍMICA DE POLÍMEROS COM LÍQUIDOS IÔNICOS COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL	74
Fabiana de Oliveira Pereira, Adriele Sabrina Todero, Paloma Truccolo Reato, Marcelo Luis Mignoni	74

APRESENTAÇÃO

O livro *Expressões Acadêmicas* é fruto das pesquisas realizadas no âmbito dos Trabalhos de Conclusão de Curso dos acadêmicos do curso de Engenharia Química da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim, ao longo do ano de 2025.

Ao saudar esta publicação, reitero minha crença neste modelo formativo, que valoriza o trabalho conjunto entre docentes, discentes e professores orientadores. Nos últimos anos, temos superado o tradicional modelo de monografias, avançando em direção a uma prática que visa à divulgação da pesquisa científica desenvolvida no contexto universitário, aproximando a Universidade da comunidade.

A obra está estruturada em cinco capítulos independentes, permitindo que a leitura ocorra de forma livre, conforme o interesse do leitor, uma vez que cada capítulo explora diferentes campos de pesquisa dentro da engenharia química.

Assim, este livro reúne estudos que refletem o compromisso com a pesquisa aplicada e a sustentabilidade, apresentando múltiplos olhares sobre temas relevantes para o desenvolvimento regional e a preservação ambiental. Iniciamos com o *Tratamento de efluente de abatedouro de aves com membranas de ultrafiltração*, que explora soluções viáveis para o reúso de água em processos industriais. Avancamos para a *Análise físico-química de cachaças artesanais produzidas na microrregião de Erechim*, destacando a importância da qualidade e valorização dos produtos locais. Em seguida, o *Desenvolvimento e caracterização de hidromel com adição de hibisco* traz novas possibilidades para bebidas fermentadas com valor agregado. O capítulo *A vinhaça e seus múltiplos usos* revisita as potencialidades e desafios do aproveitamento deste subproduto, enquanto *Microplásticos em foco* analisa a reciclagem química de polímeros com líquidos iônicos, apontando alternativas sustentáveis para a mitigação dos impactos dos resíduos plásticos.

Cada capítulo convida o leitor a refletir sobre práticas que unem inovação, cuidado ambiental e desenvolvimento, abrindo caminhos para novas pesquisas e ações responsáveis.

Desejo a todos uma excelente leitura!

Profa. Dra. Luciana Dornelles Venquiaruto

CAPÍTULO 1

TRATAMENTO DE EFLUENTE DE ABATEDOURO DE AVES COM MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO: UMA ABORDAGEM PARA REÚSO

Eduarda Campeol¹, Bianca Trindade Oldoni², Gabriela Mesquita Bruel³, Andressa Boff⁴, Clarice Steffens⁵, Juliana Steffens⁶

¹Acadêmica do Curso de Engenharia Química (URI) – *e-mail*: duads.campeol@gmail.com

²Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (UFFS) - *e-mail*: bianca.oldoni@gmail.com

³Mestranda do Programa de Pós Graduação em Alimentos (URI) – *e-mail*: gabi.mesquita.brue@gmail.com

⁴Acadêmica do Curso de Farmácia (URI) – *e-mail*: andressa_boff@hotmail.com

⁵Profa. Dra. do Curso de Engenharia Química/Alimentos (URI) – *e-mail*: clarices@uricer.edu.br

⁶Profa. Dra. do Curso de Engenharia Química/Alimentos (URI) – *e-mail*: julisteffens@uricer.edu.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o tratamento de efluentes gerados em abatedouros avícolas, com foco no uso de membranas de ultrafiltração para o reúso da água. A indústria avícola consome grandes volumes de água e, como consequência, gera efluentes com elevada carga orgânica. A revisão descreve o tratamento inicial por processos físicos, químicos e biológicos, que removem sólidos, óleos, gorduras e matéria orgânica. Em seguida, os efluentes passam por lagoas de estabilização que reduzem ainda mais a carga poluente. A aplicação de membranas de ultrafiltração complementa esse processo, promovendo a retenção de partículas, microrganismos e colóides, e assegurando uma água de qualidade para reúso. O texto também discute os desafios operacionais, como o *fouling*, e as estratégias de limpeza necessárias. Além disso, destaca a importância do reúso planejado da água como solução sustentável frente à escassez hídrica. A revisão reforça que o uso de tecnologias de membranas contribui para a eficiência operacional, reduzir custos e minimizar

impactos ambientais. Conclui-se que a adoção de sistemas avançados de tratamento representa uma alternativa viável e necessária para a sustentabilidade na indústria avícola.

Palavras-chave: processos de separação por membranas; tratamento de efluentes; abatedouro de aves; reúso de água.

Introdução

A avicultura está entre as atividades agroindustriais que mais demandam água, tanto para a criação das aves quanto para o abate e processamento. A água é um recurso fundamental em todas as etapas da produção, desde o fornecimento para o consumo e bem-estar das aves nos aviários até o uso intensivo durante o abate e preparo das carcaças. Nos abatedouros, é amplamente empregada para garantir a segurança alimentar e o cumprimento de padrões sanitários rigorosos, tanto em processos como a limpeza inicial das aves, a remoção de penas, a evisceração e o resfriamento das carcaças, quanto a higienização de equipamentos e superfícies de trabalho, incluindo os caminhões utilizados para meio de transporte (Meneses; Stratton; Flores, 2017). Estima-se que para cada ave abatida são necessários quase 30 L (trinta litros) de água. Esse alto consumo se deve pelos rígidos padrões de segurança alimentar, especialmente para exportação, porém, gera grandes volumes de efluentes ricos em resíduos orgânicos, nutrientes, produtos químicos e patógenos, que demandam um tratamento antes do descarte, evitando a contaminação dos recursos hídricos (Rodrigues, 2023).

O tratamento dos efluentes, principalmente os carregados de matéria orgânica como nas indústrias avícolas, envolvem uma combinação de etapas físico-químicas e biológicas para garantir a remoção eficaz dos poluentes e atender às normas ambientais. O processo tem início com a separação física dos sólidos, como penas e outros fragmentos, utilizando peneiras e decantadores. Em seguida, ocorre a remoção de óleos e gorduras por coagulação/floculação, nas quais as partículas mais leves são capturadas e removidas da superfície (Rajasulochana; Preethy, 2016). Após essas etapas iniciais, os efluentes seguem para um tratamento biológico, no qual as bactérias degradam a matéria orgânica presente na água. Esse processo pode ocorrer em sistemas aeróbicos, que fornecem oxigênio a fim de acelerar a atividade dos microrganismos, ou em sistemas anaeróbicos, sem a presença de oxigênio (Von Sperling, 2014).

Posteriormente, os efluentes passam por lagoas de estabilização (naturais ou artificiais), que são grandes reservatórios ou lagos que utilizam processos naturais de degradação para reduzir ainda mais a carga orgânica e os nutrientes. Essas lagoas aproveitam a ação de microrganismos, a luz solar e a sedimentação

para melhorar a qualidade da água de forma que atenda aos padrões de lançamento para corpos receptores (Von Sperling; Chernicharo, 2017).

Devido à grande quantidade de água utilizada nos abatedouros de aves, o reúso desse recurso torna-se uma ação necessária para promover a sustentabilidade, otimizar os processos operacionais e uma possibilidade de redução de custos. Além dos benefícios econômicos e ambientais, a adoção dessa prática também promove uma imagem positiva da empresa em relação à responsabilidade ambiental, mostrando o comprometimento com a preservação dos recursos hídricos. Dessa maneira, a água que já passou pelo processo de tratamento após as lagoas, poderia ser reutilizada (Kist; El Moutaqi; Machado, 2009).

Para garantir a eficácia do reúso, é necessário um tratamento adequado da água coletada. O uso de membranas no tratamento de efluentes tem se destacado como uma alternativa eficiente e moderna para melhorar a qualidade da água. De acordo com Sharma, Zhu & Ronen (2024), os sistemas de membranas oferecem benefícios como a operação contínua e em temperatura ambiente, menor necessidade de espaço físico e possibilidade de reúso dessa água tratada. Dentre as membranas, a ultrafiltração pode ser utilizada pois possuem poros de tamanho entre 0,01 a 0,1 micrômetro (μm), ou seja, entre 10 e 100 nanômetros (nm) que permitem a passagem de água e alguns solutos pequenos, enquanto retêm partículas maiores, microrganismos e coloides (Yu *et al.*, 2022).

Portanto, ao complementar os processos de lagoas de estabilização, as membranas podem contribuir para uma qualidade de água superior. À medida que a conscientização sobre a gestão responsável dos recursos hídricos cresce, a implementação dessas tecnologias avançadas, como a ultrafiltração, se torna fundamental para promover a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental na indústria avícola, contribuindo para um futuro mais sustentável e com menor impacto ambiental.

Dentro deste contexto, esta revisão tem como objetivo reunir informações que suportem o uso de membranas de ultrafiltração como tecnologia de pós-tratamento de efluentes provenientes de abatedouros de aves, avaliar a possibilidade de reúso da água no processo, assim como trazer os desafios e perspectivas futuras.

Metodologia

A busca por materiais foi realizada utilizando as seguintes bases de dados: ScienceDirect, SciELO, Google Scholar, ResearchGate, MDPI, trabalhos de conclusão de curso, teses, dissertações, livros da biblioteca virtual da Universidade (URI-Erechim), normas e legislações tanto brasileiras quanto

internacionais. Foram incluídos artigos publicados entre 2013 e 2024, nos idiomas português e inglês, que abordassem aspectos técnicos, operacionais e econômicos dos sistemas de separação por membranas. As palavras-chave utilizadas foram: "tratamento de efluentes avícolas", "ultrafiltração", "membranas de separação", "fouling", "reúso de água em frigoríficos", "wastewater treatment in poultry slaughterhouses", "ultrafiltration membranes", "hollow fiber membranes" e "membrane fouling".

Problemática da água

A água é um dos recursos naturais mais valiosos do planeta, e apesar de sua grande quantidade, cerca de 97,5% da água disponível é salgada, tornando-se inadequada para o consumo humano e agrícola. Da parcela restante, aproximadamente 30% está armazenada no subsolo, enquanto uma fração significativa encontra-se em geleiras. Apenas cerca de 1% da água doce está acessível em rios e lagos (ANA, 2024).

Nos últimos anos, o crescimento populacional, aliado à intensificação das atividades econômicas, agrícolas e energéticas, tem aumentado significativamente a demanda por recursos hídricos. Diante desse cenário, a adoção de práticas de consumo consciente e o aprimoramento na gestão da água tornaram-se essenciais para garantir a sustentabilidade desse recurso (Lima, 2018).

Entre 2014 e 2016, a região Sudeste do Brasil vivenciou uma das mais severas crises hídricas da história, resultado de fatores como a gestão inadequada das reservas de água e a ocupação irregular de áreas de recarga. Essa escassez compromete tanto os ecossistemas quanto a qualidade de vida da população, impactando diretamente no abastecimento de milhões de pessoas (Silva; Samora, 2019).

Além disso, uma pesquisa recente da *The Nature Conservancy Brasil* (2024) revelou que 78% da população percebe um aumento na poluição das águas. O estudo também apontou que sete em cada dez brasileiros consideram que a água é um recurso amplamente explorado, mas pouco preservado, evidenciando a necessidade de maior conscientização e educação ambiental para promover o emprego sustentável da mesma.

De acordo com os dados do Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil, o uso de corpos hídricos pode aumentar em 24% até 2030, deixando os números de consumo cada vez mais altos (Hidroplan, 2022).

Efluentes de abatedouro

Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, s.d.), a produção de proteína animal brasileira se concentra, principalmente, na região sul e sudeste, totalizando 80% de toda a criação. Em 2023, foram produzidas 14.833 milhões de toneladas de carne de frango, sendo que aproximadamente 35% desse valor foi exportado para outros países (ABPA, 2024).

A Portaria nº 210 de 1998 afirma que o consumo médio de água em abatedouros avícolas poderá ser calculado tomando por base o volume de 30 (trinta) litros por ave abatida, incluindo nesse valor o consumo de todas as seções do abatedouro.

A Figura 1 apresenta um fluxograma de etapas dos processos nos quais ocorrem a produção de resíduos líquidos no abate e os tipos de rejeitos gerados.

Figura 1. Etapas do processo de abatimento de frangos e tipos de resíduos gerados



Fonte: Adaptado de Teixeira (2015).

A partir da Figura 1, verifica-se que são gerados efluentes de diversas etapas do processamento, e que a partir destas são geradas grande quantidade de efluentes. Por exemplo, se para cada ave abatida são utilizados cerca de 30 litros de água, em um abatedouro que abate cerca de 100.000 (cem mil) aves por dia, são gerados cerca de 3.000.000 (três milhões) de litros de efluentes.

Tratamento de Efluentes

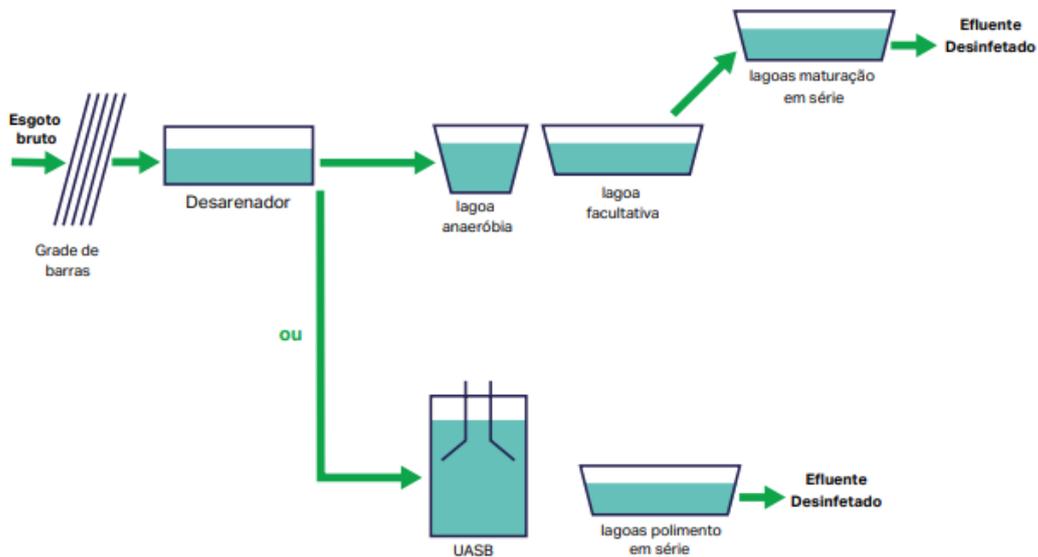
Os constituintes dos efluentes de abatedouro são vastos, por isso são utilizadas diversas operações unitárias para o tratamento de efluentes, sendo eles processos físicos, químicos e biológicos que serão descritos abaixo de acordo com Metcalf & Eddy, (2016):

- Processos unitários físicos: predominam uso de forças físicas (de atração), como peneiramento, floculação, filtração, sedimentação e adsorção;
- Processos unitários químicos: ocorre por meio de adição de produtos químicos e/ou reações químicas, como precipitação, transferência de gases, adsorção e desinfecção;
- Processos unitários biológicos: ocorre a remoção de contaminantes ou conversão em outros componentes por meio de atividade biológica, para remover substâncias orgânicas biodegradáveis, coloidais ou dissolvidas, nitrogênio e fósforo.

Os processos de tratamento também são divididos em níveis, conforme encontrado em Vasconcelos (2020), representado na Figura 2.

- Tratamento Preliminar: remoção de sólidos grosseiros por grades de separação ou caixas de areia;
- Tratamento Primário: remoção de sólidos flutuantes, em suspensão ou sedimentáveis (óleos e graxas);
- Tratamento Secundário: remoção de matéria orgânica dissolvida ou solúvel, em reatores biológicos e/ou tratamentos físico-químicos;
- Tratamento Terciário: remoção de nitrogênio e fósforo, patógenos ou qualquer outro poluente, também por reator biológico ou físico-quimicamente.

Outros tratamentos avançados também podem ser realizados, como a utilização de membrana filtrantes para retirar compostos específicos, tema que será abordado à frente.

Figura 2. Esquema de lagoas de estabilização em uma ETE (Estação de Tratamento de Efluentes)

UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* / Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente.

Fonte: Adaptado de Arcadis, (2022).

No Brasil, as condições para lançamento de efluentes em corpos receptores estão descritos na Resolução do CONAMA nº 430 de 13/05/2011, Seção II, Art.16 que diz:

Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam às condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis:

- a) pH entre 5 a 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;
- e) óleos e graxas:
 1. óleos minerais: até 20 mg/L;
 2. óleos vegetais e gorduras animais: até 50mg/L;
- f) ausência de materiais flutuantes; e

g) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

O não cumprimento dessas condições pode acarretar aos infratores às sanções previstas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e em seu regulamento.

Reúso de água na indústria

No cenário atual, de crescente escassez de água potável no mundo, o reúso surge como estratégia importante de reduzir o consumo de recursos hídricos (Legner, 2021). A separação dos diferentes usos para o efluente é essencial para garantir a segurança sanitária, a eficiência do processo e a aplicação correta para a reutilização. Segundo a CETESB (2019), o reúso pode ser classificado como direto ou indireto, planejado ou não, dependendo da forma como o efluente tratado é utilizado.

Sendo assim, reúso indireto planejado é aquele em que se tem uma preocupação com a descarga dos efluentes em outros recursos hídricos, sujeito à mistura com outros efluentes também devidamente tratados e de acordo com as normas de regulamentação. Já o reúso direto planejado acontece quando são diretamente levados ao lugar de reúso, não sendo despejados no meio ambiente, ocorrendo, normalmente, quando se utiliza esse efluente para irrigação (CETESB, 2019).

No Brasil, o reúso de água em abatedouros de aves é permitido para fins não potáveis, como lavagem de pisos, irrigação e resfriamento de equipamentos, desde que não haja contato com carcaças ou alimentos. A prática é regulamentada pela Instrução Normativa nº 51/2020 do MAPA, e a água deve atender aos padrões da Portaria GM/MS nº 888/2021, especialmente quanto aos parâmetros microbiológicos. A Resolução CONAMA nº 430/2011 é usada como referência para a qualidade da água tratada. Reúso com fins potáveis ou que envolvam contato direto com produtos exigem tratamento avançado e aprovação prévia dos órgãos competentes. Também é necessário verificar normas estaduais e municipais aplicáveis.

O relatório da FAO/OMS (2023), embora seja voltado à indústria de laticínios, também pode ser aplicado ao setor frigorífico. Ambas as indústrias utilizam grandes volumes de água em processos de limpeza, desinfecção e resfriamento, gerando efluentes com alta carga orgânica. Portanto, para o reúso de água em frigoríficos, exige-se uma atenção quanto à segurança

microbiológica, sendo necessário adotar tratamentos adequados, monitoramento contínuo e validação do sistema de reúso.

O reúso no Brasil ainda se encontra escasso, apenas 1% da água do país inteiro é proveniente de reúso. O reúso já é uma realidade em países como Israel (90%), Singapura (40%), Austrália (15%) e Estados Unidos (10%), que possuem o esgoto tratado para reutilização. São as maiores taxas de reúso de esgoto do mundo. Em Israel, dezenas de usinas fornecem mais de 400 milhões de metros cúbicos de água de reúso por ano, irrigando cerca de 130 mil hectares (Hidroplan, 2022; Szklarz, 2019; Portal Tratamento de Água, 2024).

O Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos (2017) diz que:

As águas residuais também podem apresentar uma relação de custo-benefício positivo e constituir uma fonte sustentável de energia, nutrientes e outros subprodutos úteis. Os benefícios potenciais da extração de tais recursos das águas residuais vão muito além da saúde humana e ambiental, e têm implicações sobre a segurança alimentar e energética, assim como na mitigação da mudança climática. No contexto de uma economia circular, na qual o desenvolvimento econômico é equilibrado com a proteção dos recursos naturais e a sustentabilidade ambiental, as águas residuais representam um recurso amplamente disponível e valioso (UNESCO, 2017, p. 4).

Os efluentes industriais representam riscos significativos devido à sua toxicidade e carga poluente, com impactos sobre o meio ambiente e a saúde. Para reduzir esses efeitos, é essencial adotar medidas na origem do processo, como o uso de insumos sustentáveis e a capacitação das equipes, além de incentivar a reutilização da água nas próprias instalações. Embora existam exigências legais, muitas empresas ainda optam por pagar multas em vez de tratar adequadamente seus resíduos. A cooperação entre indústrias surge como alternativa viável, promovendo o reaproveitamento de efluentes na vizinhança. A recuperação de energia e nutrientes pode transformar os resíduos em fontes de receita, especialmente em cenários de escassez hídrica (UNESCO, 2017).

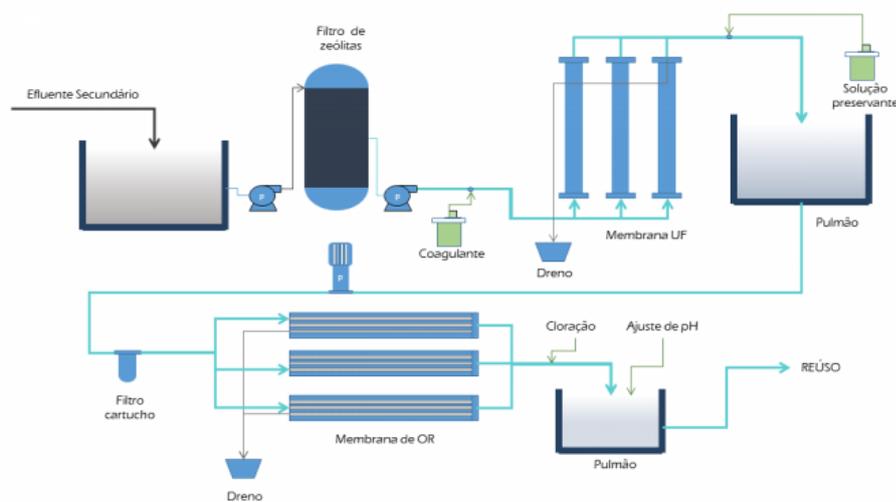
O uso de águas residuais ainda enfrenta um tipo de resistência da população, principalmente pela desconfiança quanto aos riscos à saúde. Para eliminar essas barreiras é essencial investir em ações educativas e campanhas de conscientização. Além disso, os riscos à saúde devem ser constantemente avaliados e gerenciados para garantir a segurança do processo e conquistar a aceitação pública (UNESCO, 2017).

O investimento necessário para a implantação de um sistema de ultrafiltração (UF) pode variar amplamente conforme o porte da unidade, a

complexidade operacional, a qualidade da água de entrada e a tecnologia adotada. Segundo dados de um estudo em escala real, os custos operacionais mensais da ultrafiltração são, em média, 5,6% inferiores aos de sistemas baseados em dupla filtração. Embora essa diferença não seja tão acentuada, é relevante considerar a maior consistência na qualidade da água tratada por membranas. Nos processos com UF, a variação na qualidade do efluente final é mínima, ao passo que nos sistemas convencionais, a performance pode oscilar em função das mudanças na qualidade da água bruta (Simões *et al.*, 2021).

Um exemplo de implementação é a TECMA®EPAR – Estação de Produção de Água de Reúso, constituída de um sistema de separação com membranas de ultrafiltração submersas, proporcionando um tratamento de alta qualidade, incluindo a remoção de nitrogênio. Sua operação é totalmente automatizada por um CLP (Controlador Lógico Programável), permitindo monitoramento remoto. A água tratada pode ser reutilizada em diversas atividades tanto industriais como urbanas. Um fluxograma dessa tecnologia é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Sistema implantado em uma multinacional do Setor de Bebidas



UF: Ultrafiltração; OR: Osmose Reversa.

Fonte: TECMA, (s.d.).

No contexto do reúso de água em processos industriais e agroindustriais, é essencial compreender as possíveis aplicações e os requisitos específicos de qualidade para cada finalidade. A Tabela 1 apresenta algumas aplicações potenciais da água de reúso, os requisitos de qualidade da água para as aplicações e as respectivas legislações.

Tabela 1 - Aplicações da água de reúso e principais requisitos de qualidade

Aplicação	Requisitos de qualidade	Norma/Legislação
Lavagem de pisos, caminhões e equipamentos	turbidez inferior a cinco, coliforme fecal inferior a 200 NMP/100 mL; sólidos dissolvidos totais inferiores a 200 mg/L; pH entre 6,0 e 8,0; cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L.	Resolução CONAMA nº 54/2005 ABNT NBR 13.969:1997
Irrigação agrícola (culturas alimentícias)	sem sólidos grosseiros; sem produtos químicos que geram resíduos ou que venham a gerar irritações em mucosas e peles; coliforme fecal < 100 NMP/100mL.	Resolução CONAMA nº 54/2005 FAO - <i>Irrigation Water Quality Guidelines</i> (1992)
Sistemas de resfriamento	controle de corrosão e incrustações. pH = 6,0-9,0 DBO ≤ 30 mg/L, SST ≤ 30 mg/L, coliformes fecais ≤ 200/100 mL, cloro residual 1 mg/L.	EPA <i>Guidelines</i> (2012)

Processo de Separação por Membranas (PSM)

Tratamentos avançados podem ser realizados em efluentes, como a utilização de membrana filtrantes para retirar compostos específicos. São utilizadas a filtração por membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. Segundo Howe *et al.*, (2016) as membranas para tratamento de água e efluentes são classificadas conforme o tamanho de seus poros, incluindo microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, cada uma adequada para remover contaminantes específicos, desde partículas maiores até íons e moléculas dissolvidas e sob diferentes faixas de pressão.

No processo de ultrafiltração, o efluente tratado passa por membranas com poros que retêm partículas, microrganismos e outros contaminantes, resultando em uma água de qualidade elevada que pode ser reaproveitada em diversas atividades. Isso inclui o uso em processos de limpeza, resfriamento de equipamentos e irrigação de áreas verdes, diminuindo significativamente o impacto ambiental. Com a ultrafiltração, empresas podem otimizar o ciclo da água em suas operações, reduzindo a quantidade de efluente descartado e minimizando a pressão sobre fontes de água potável (Qasim *et al.*, 2019). A Tabela 2 apresenta detalhadamente os diferentes tipos de membrana e suas aplicações.

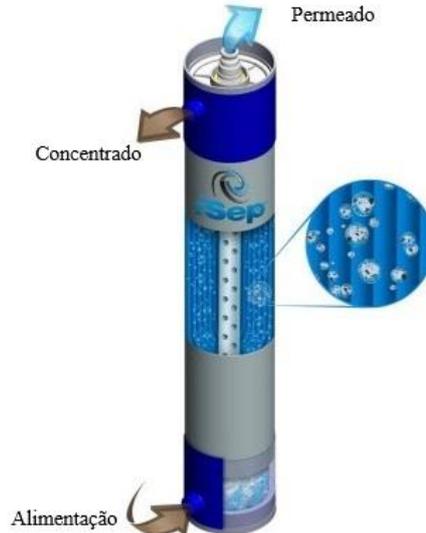
Tabela 2. Membranas filtrantes, suas características e aplicações

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ	MECANISMO DE AÇÃO	MATERIAL RETIDO	APLICAÇÕES
Microfiltração (MF)	Gradiente de pressão 0.1 – 1 bar	Exclusão	Material em suspensão 0.1 – 10 µm	- Clarificação de vinho e cerveja - Esterilização bacteriana - Concentração de células
Ultrafiltração (UF)	Gradiente de pressão 0.5 – 5 bar	Exclusão	Coloides, macromoléculas PM > 5000	- Fracionamento e concentração de proteínas - Recuperação de pigmentos - Recuperação de óleos
Nanofiltração (NF)	Gradiente de pressão 1.5 – 40 bar	Exclusão /Difusão	Moléculas de peso molecular médio 500 < PM < 2000	- Purificação de proteínas - Separação de compostos orgânicos e sais divalentes
Osmose Inversa (OI)	Gradiente de pressão 20 – 100 bar	Difusão	Todo material solúvel ou em suspensão	- Dessalinização de águas - Desmineralização da água

Fonte: Adaptado de Labvirtual (2019)

A Figura 4 representa um módulo de ultrafiltração, com a entrada de alimentação e saídas de permeado e concentrado.

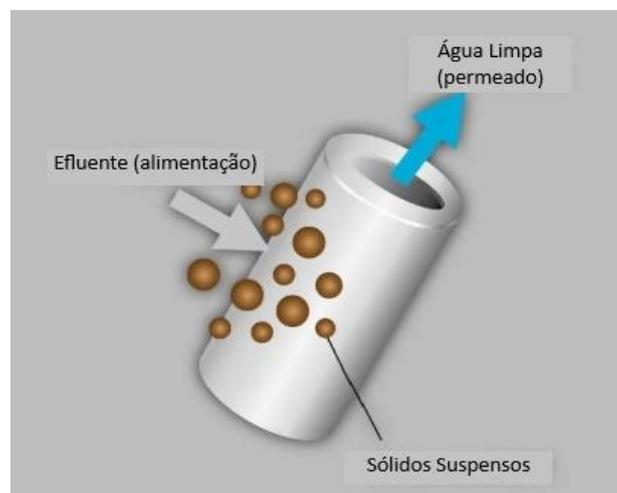
Figura 4. Estrutura do módulo de ultrafiltração MICRODYN iSep™ 50



Fonte: Mann+Hummel (2020, p. 4).

A Figura 5 mostra como funciona uma membrana de ultrafiltração do tipo fibra oca com fluxo de fora para dentro (*outside-in*). Nesse sistema, a água com impurezas entra em contato com a parte de fora das fibras, enquanto a água já filtrada é coletada por dentro da membrana. Esse formato aproveita melhor a área disponível da membrana, o que ajuda a aumentar o fluxo e melhorar a eficiência na remoção das partículas (Microdyn-Nadir GmbH, s.d.).

Figura 5. Funcionamento do módulo de ultrafiltração de membrana de fibra oca



Fonte: Adaptado de Microdyn-Nadir GmbH (s.d.).

Um dos maiores problemas que o processo de separação de membranas sofre é o chamado *fouling* ou incrustação, que é nada mais que o entupimento dos pequenos poros que as membranas possuem, afetando a eficiência e durabilidade dos sistemas. Isso ocorre pelo acúmulo de partículas na superfície ou nos poros, diminuindo o fluxo de permeado e aumentando a necessidade de limpeza ou substituição dos módulos (Sharma; Zhu; Ronen, 2024).

A frequência de limpeza das membranas varia conforme a aplicação, podendo ser diária na indústria alimentícia ou mensal em sistemas de água ultrapura. O procedimento padrão inclui enxágue com água quente, lavagem com solução ácida ou alcalina, aplicação de detergente e enxágue final. Mesmo após a limpeza, alguma perda de fluxo é esperada com o tempo. Técnicas como o *backflushing*, que reverte o fluxo da membrana para remover impurezas, são usadas em módulos resistentes, como os cerâmicos e capilares, mas não em espiral devido à sua fragilidade. Para evitar contaminações, recomenda-se o uso de bacteriostáticos no enxágue final quando as membranas são armazenadas úmidas (Baker, 2012). A distribuição desuniforme do fluxo e a geometria da fibra têm impacto direto na formação de incrustações, as configurações em pé tendem a gerar mais incrustação que horizontais devido à pior distribuição de fluxo (Li *et al.*, 2022).

Diante desses desafios operacionais, estudos vêm demonstrando a eficiência das membranas em contextos industriais específicos. Em trabalho realizado por Fappi (2015), foi apresentado a seguinte eficiência de membranas de ultrafiltração utilizadas em efluentes proveniente de indústria frigorífica de suínos: sólidos totais voláteis (23% - 51%), turbidez (87% - 99%), nitrogênio amoniacal (54% - 69%) e DQO (77% - 85%). Demonstrando assim, uma melhora significativa do efluente em comparação ao sem pós-tratamento.

Fluxo de Permeado, Permeabilidade e Resistências das Membranas

O fluxo de permeado é uma variável essencial em processos com membranas, sendo definido como a quantidade (em termos de volume, massa ou mols) de permeado que atravessa a membrana por unidade de área, ao longo do tempo. O fluxo depende de várias características como as condições de operação e das características do fluido a ser tratado (Habert *et al.*, 2006). O cálculo do fluxo de permeado pode ser realizado pela equação 1:

$$J_p = \frac{V}{A \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

J_p = fluxo de permeado (L/m².h)

V = volume de permeado (L)

A = área da membrana (m²)

t = tempo de operação (h)

Outro dado importante a ser levado em consideração é a Resistência das Membranas representada por R_m (m⁻¹):

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_p} \quad (2)$$

Onde:

ΔP = variação de pressão (Pa)

μ = viscosidade dinâmica (Pa.s)

J_p = fluxo de permeado (m³/m²h)

O que também pode ser calculado é a Resistência do *fouling* (ou depósito), R_f (m⁻¹), e após isso calcular a Resistência Total da membrana (R_t).

Aplicações de membranas no tratamento de efluentes de abatedouros

As tecnologias de membranas, como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR), são amplamente empregadas para remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica, microrganismos e sais. Cada tipo de membrana é adequado para uma etapa específica do tratamento. A microfiltração, por exemplo, é eficaz na remoção de sólidos grosseiros e gordura.

Fatima *et al.* (2024) avaliaram o uso combinado de microfiltração (MF) e osmose reversa (RO) para o tratamento de efluentes de abatedouros avícolas, demonstrando a viabilidade técnica e econômica da aplicação. A combinação MF-RO foi capaz de remover mais de 91% da DQO e alcançar 100% de remoção de fósforo total, além de reduzir o nitrogênio total a níveis inferiores a 5 mg/L. O processo também apresentou maior eficiência na retenção de sólidos e no fluxo de permeado, com valores próximos a 54,5 L/m².h, sendo superior ao RO direto. Além disso, o custo de operação do sistema MF-RO foi significativamente inferior

(US\$ 1,37/m³) quando comparado ao RO direto (US\$ 3,80/m³), evidenciando o benefício do pré-tratamento na redução de incrustações e no prolongamento da vida útil das membranas. Esses resultados reforçam o potencial do reúso de água tratada com membranas em unidades industriais, especialmente em setores como o frigorífico, onde a demanda por água é elevada e os requisitos de qualidade para reúso são rigorosos.

Fatima *et al.*, (2023) usaram processos sequenciais de membranas, combinando ultrafiltração, e osmose reversa (RO) para tratar efluentes semiprocessados de abatedouros de aves. A ultrafiltração removeu 36,7% da DQO e 38,9% do fósforo total. E a osmose reversa aprimorou a qualidade da água tratada, tornando-a adequada para reúso industrial.

Mkilima *et al.*, (2022) investigaram o uso de membranas de nanofiltração com diferentes tamanhos de poro (0,4; 0,6; 0,8 nm) para remover fósforo total, amônia, nitrato e nitrito de efluentes de abatedouros de aves. A eficiência de remoção variou conforme o tamanho do poro, com o melhor desempenho observado para nitrato com membranas de 0,4 nm (90,5% de remoção). A combinação de ultrafiltração e nanofiltração resultou em eficiências de remoção entre 97,8% e 99,71% para os parâmetros analisados.

Avanços e tendências futuras

Diante da escassez hídrica e da crescente exigência por métodos industriais mais sustentáveis, a separação por membranas se destaca como uma tecnologia eficaz tanto no tratamento e reúso de efluentes, quanto na comercialização do concentrado com valor agregado. Além do tratamento de água e efluentes, as membranas têm aplicações em diversos setores como farmacêutico, alimentício e de biotecnologia, devido à sua capacidade de separação e eficiência energética (Ma *et al.*, 2024).

A incrustação das membranas, ocorre como já citado, no acúmulo de sólidos/microrganismos nos poros, reduzindo o fluxo e eficiência. Um estudo de Ahmad *et al.* (2022), expõe uma série de técnicas de modificação, que oferecem os benefícios tanto da redução de incrustações quanto do ajuste de desempenho, disposto na tabela 3.

Tabela 3. Estratégias para o desenvolvimento de membranas anti-incrustantes

Estratégia de Modificação	Tipo de Modificador	Vantagens
Mistura na solução de preparo ou na etapa de polimerização interfacial	Nanopartículas metálicas e óxidos metálicos (ex: Ag, ZnO, TiO ₂)	têm propriedades antimicrobianas (biocidas) e hidrofílicas
	Nanomateriais de carbono CNT (<i>Carbon Nanotubes</i>), GO (<i>Graphene Oxide</i>), CQDs (<i>Carbon Quantum Dots</i>)	Melhoram permeabilidade e <i>antifouling</i> por aumento da hidrofilicidade e redução de rugosidade
	Estruturas metal-orgânicas (MOFs)	Grande área superficial e funcionalização ajustável; promovem permeabilidade e <i>antifouling</i>
	<i>Covalent Organic Frameworks</i> (COFs)	Alta porosidade, estrutura ordenada, boa integração com a matriz polimérica
	POSS (Poliedros de silsesquioxano)	Alta estabilidade térmica e mecânica, melhora <i>anti-fouling</i> e rejeição
	Argilas modificadas (ex: montmorilonita)	Aumentam hidrofilicidade e melhoram rejeição de corantes e metais
Modificação superficial	Revestimentos, enxertos, acoplamento covalente, plasma	Permite alteração da carga superficial, rugosidade e hidrofilicidade sem alterar estrutura base

Os processos de ultrafiltração (UF) apresentam altas eficiências de remoção de sólidos em suspensão e macromoléculas orgânicas, enquanto a incrustação é o maior obstáculo que afeta a ampla aplicação da tecnologia de UF. Para resolver esse problema, várias medidas de pré-tratamento, como coagulação, adsorção, alteração de pH e oxidação avançada, são aplicadas com o intuito de minimizar esse entupimento (Zhang *et al.*, 2023; Ahmad *et al.*, 2022).

Vê-se também um potencial para a recuperação de subprodutos de valor a partir do concentrado. O concentrado varia conforme o tipo de efluente a ser tratado, pode ser encontrado, minerais, proteínas e outros nutrientes (Gil, 2017). Em estações de tratamento de efluentes de abatedouros, onde a concentração de fósforo e nitrogênio seria interessante conseguir a recuperação para o uso como fertilizantes, como é realizado na produção de biogás (CIBiogás, s.d.), além de lipídios (gorduras) para a produção de biocombustíveis.

Impulsionado pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, vem a preocupação das indústrias para o consumo e produção sustentáveis, que devem garantir os padrões dos mesmos (Governo do Distrito Federal, s.d.; ONU, s.d.). Nesse cenário, a preocupação em todos os setores produtivos só cresce para que adotem práticas que minimizem o uso de recursos hídricos, e conseqüentemente diminuam a geração de efluentes e ainda ocorra a reutilização da água. O reúso, portanto, surge como uma maneira de promover a economia circular diante das mudanças climáticas e escassez hídrica (MMA, 2023).

Considerações Finais

Este trabalho destaca a importância das membranas de ultrafiltração no tratamento de efluentes gerados por abatedouros de aves. A avicultura utiliza grandes volumes de água e gera efluentes com alta carga de poluentes. Por isso, o reúso da água, após tratamento adequado, surge como uma alternativa viável e necessária para reduzir impactos ambientais e economizar recursos. As membranas de ultrafiltração removem com eficiência microrganismos, partículas e compostos indesejáveis, melhorando a qualidade da água tratada. Além disso, essa tecnologia ocupa pouco espaço, funciona em temperatura ambiente e pode ser integrada a outras etapas de tratamento. Apesar de apresentar desafios, como o entupimento dos poros (*fouling*), o uso de técnicas de limpeza e manutenção adequadas ajuda a manter a eficiência do sistema. O reúso da água, quando planejado e seguro, contribui para a sustentabilidade da indústria, reduz custos operacionais e reforça o compromisso ambiental das empresas. Assim, conclui-se que o uso de membranas de ultrafiltração representa uma solução tecnológica

eficiente e sustentável para o tratamento de efluentes na indústria avícola, especialmente em um cenário de crescente escassez de água.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 13.969: **Reúso de água - Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

ABPA, Associação Brasileira de Proteína Animal. **Good Food**. [s.d]. Disponível em: <https://abpa-br.org/sustentabilidade/>. Acesso em: 3 set. 2024.

ABPA, Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual 2024**. Disponível em: https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf. Acesso em: 3 set. 2024.

AHMAD, N. N. R. *et al.* An overview of the modification strategies in developing antifouling nanofiltration membranes. **Membranes**, v. 12, n. 12, p. 1276, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12121276>. Acesso em: 2 maio 2025.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Água no mundo**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo//>. Acesso em: 28 ago. 2024.

ARCADIS. **Arcadis Brasil**. Disponível em: <https://www.arcadis.com/pt-br>. Acesso em: 6 abr. 2025.

BAKER, R. Microfiltration. *In*: BAKER, R. Membrane Technology and Applications. 3rd ed. California: John Wiley & Sons Ltd, 2012. p. 271.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Secretaria de Defesa Agropecuária. **Portaria N° 210 de, 10/11/1998**. Regulamento Técnico da Inspeção Tecnológica e Higiênico Sanitária de Carne de Aves. Diário Oficial da União, Brasília 1998. Disponível em: <https://abrir.link/ZYKaA>. Acesso em: 16 set. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 430 de, 13/05/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17/03/2005. Disponível em: <https://abrir.link/RRJGU>. Acesso em: 17 set. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica>. Acesso em: 2 maio 2025.

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F. *et al*. Slaughterhouse Wastewater Characterization and Treatment: An Economic and Public Health Necessity of the Meat Processing Industry in Ontario, Canada. **Journal Of Geoscience and Environment Protection**, n. 4, v. 4, p. 175-186, 2016.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 88, 5 maio, 2021.

CETESB. Reúso de Água. São Paulo: **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2019/01/Aula-08-Reuso-de-Agua-11jan19-T3.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

CIBiogás. **O papel do tratamento de efluentes e recuperação de nutrientes na sustentabilidade**. [S. l.]:CIBiogás, [s.d.]. Disponível em: <https://cibogas.org/blog/o-papel-do-tratamento-de-efluentes-e-recuperacao-de-nutrientes-na-sustentabilidade/>. Acesso em: 2 maio 2025.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Manual de procedimentos e técnicas laboratoriais voltados para análises de águas e esgotos sanitários e industriais**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Laboratório de Saneamento "Profo Lucas Nogueira Garcez". Disponível em: https://www.sidneyseckler.com/_files/ugd/1ecddd_8cac784ef4b645adbb04d80abc54f5e3.pdf

FAO. Wastewater treatment and use in agriculture. **FAO Irrigation and Drainage Paper 47**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992. Disponível em: <https://www.fao.org/4/t0234e/T0234E08.htm#ch7>. Acesso em: 28 abr. 2025.

FAO; OMS. Segurança e qualidade do uso e reúso da água no processamento de laticínios: **relatório das Reuniões Conjuntas FAO/OMS de Especialistas em Avaliação de Risco Microbiológico (JEMRA)**. Roma: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/seguranca-e-qualidade-do-uso-e-reuso-da-agua-na-producao-de-lacteos>. Acesso em: 17 abr. 2025.

FAPPI, Devanir André. **Micro e ultrafiltração como pós-tratamento para reúso de efluentes de abatedouro e frigorífico de suínos**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

FATIMA, F. *et al.* An Evaluation of Microfiltration and Ultrafiltration Pretreatment on the Performance of Reverse Osmosis for Recycling Poultry Slaughterhouse Wastewater. **Separations**, v. 11, n. 4, p. 115, 1 abr. 2024. Acesso em: 5 maio 2025.

FATIMA, F.; DU, H.; KOMMALAPATI, R. R. A Sequential Membrane Process of Ultrafiltration Forward Osmosis and Reverse Osmosis for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment and Reuse. **Membranes**, v. 13, n. 3, p. 296, 1 mar. 2023. Acesso em: 5 maio 2025.

GIL, A. P. **Recuperação de compostos bioativos a partir de resíduos agroindustriais utilizando processos de separação por membranas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **Agenda 2030**: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Secretaria de Relações Internacionais, [s. d.]. Disponível em: <https://www.internacional.df.gov.br/agenda-2030-objetivos-do-desenvolvimento-sustavel/>. Acesso em: 2 maio 2025.

HIDROPLAN. Água de reúso: o que é e qual sua importância. **Hidroplan**, 12 jan. 2022. Disponível em: <https://www.hidroplan.com.br/site/blog-era-da-agua/51-agua-de-reuso-o-que-e-e-qual-sua-importancia>. Acesso em: 17 abr. 2025.

HOWE, K. J. *et al.* **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522124084/>. Acesso em: 17 set. 2024.

KIST, L. T.; EL MOUTAQI, S.; MACHADO, E. L. Cleaner production in the management of water use at a poultry slaughterhouse of Vale do Taquari, Brazil: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 1200-1205, 2009. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.04.006. Acesso em: 08 jun. 2025.

LEGNER, C. O reúso como alternativa para escassez de água. **Revista TAE – Tratamento de Água e Efluentes**, São Paulo, n. 61, p. 1-5, jun./jul. 2021. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/704/o-reuso-como-alternativa-para-escassez-de-agua>. Acesso em: 17 abr. 2025.

LI, J. *et al.* A review on hollow fiber membrane modules towards high separation efficiency: process modeling from fouling perspective. **Chinese Chemical Letters**, v. 33, p. 3594-3602, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2021.10.044>. Acesso em: 30 abr. 2025.

LIMA, E. P. C. **Água e Indústria: experiências e desafios**. 1. ed. Eduardo Pedroza da Cunha Lima: Infinita Imagem, 2018. 119 p. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/livros/a_guaa_ea_Inda_striaa_-a_Expera_nciasa_ea_Desafios.pdf. Acesso em: 28 ago. 2024.

MA, R. *et al.* The Application of Membrane Separation Technology in the Pharmaceutical Industry. **Membranes**, v. 14, n. 1, p. 24, 2024. DOI: 10.3390/membranes14010024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/14/1/24>. Acesso em: 1 maio 2025.

MANN+HUMMEL. **MICRODYN iSep 500 Ultrafiltration Modules – Product Manual**. 2020. Disponível em: <https://water-membrane-solutions.mann-hummel.com/content/dam/lse-wfs/product-related-assets/manuals-guides/MICRODYN-iSep-500-Ultrafiltration-Modules-Product-Manual.pdf>.

MENESES, Y. E.; STRATTON, J.; FLORES, R. A. Water reconditioning and reuse in the food processing industry: Current situation and challenges. **Trends in food science & technology**, v. 61, p. 72-79, 2017. Acesso em: 13 abr. 2025.

METCALF AND EDDY. INC. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Porto Alegre: Grupo A, 2016. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555240/>. Acesso em: 17 set. 2024.

MKILIMA, T. *et al.* Pore Size in the Removal of Phosphorus and Nitrogen from Poultry Slaughterhouse Wastewater Using Polymeric Nanofiltration Membranes. **Water**, v. 14, n. 18, p. 2929, 19 set. 2022. Acesso em: 5 maio 2025.

Portal de Engenharia Química - Início. [s.d.]. Disponível em:

<http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php>. Acesso em: 17 set. 2024.

QASIM, M. *et al.* Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review.

Desalination, v. 459, p. 59-104, 2019.

RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review.

Resource-Efficient Technologies, v. 2, n. 4, p. 175-184, 2016. DOI:

10.1016/j.refit.2016.09.004. Acesso em: 14 set. 2024.

RODRIGUES, A. S. **Tratamento primário do efluente proveniente de uma indústria de abate de aves utilizando diferentes coagulantes**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Trabalho de Conclusão de Curso, Campo Mourão, 2023. Disponível em:

<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33114>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SHARMA, C. P.; ZHU, Z.; RONEN, A. Membrane filtration for wastewater treatment – fouling mitigation. *In*: KILIÇ TAŞELI, Başak; JACOB-LOPES, Eduardo; QUEIROZ ZEPKA, Leila; *et al.* (Orgs.). **Wastewater treatment and sludge management systems** – The gutter-to-good approaches. [S.l.]: IntechOpen,

2024. Cap. 7. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004566>.

Acesso em: 2 maio 2025.

SILVA, J. L.; SAMORA, P. R. Os impactos da crise hídrica sobre a população do município de Campinas/SP (2012-2016). **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, p. e20170210, 2019.

SIMÕES, C. P. P. *et al.* Viabilidade econômica da ultrafiltração para a produção de água potável – Estudo de caso no Brasil. *In*: ENCONTRO TÉCNICO AESABESP – CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 31., 2021, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: AESabesp, 2021. Cap. 7. Acesso em: 1 maio 2025.

SZKLARZ, E. Vida no deserto: a guerra de Israel contra a falta d'água.

Superinteressante, São Paulo, 13 fev. 2019. Disponível em:

<https://super.abril.com.br/tecnologia/vida-no-deserto-a-guerra-de-israel-contra-a-falta-dagua>. Acesso em: 24 abr. 2025.

TECMA – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda. **Reúso na Indústria de Bebidas – RJ**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.tecma-tecnologia.com.br/web/projetos/reuso-na-industria/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

TECMA – Tecnologia em Meio Ambiente Ltda. TECMA®EPAR – **Estação de Produção de Água de Reúso (s.d.)**. Disponível em: <https://www.tecma-tecnologia.com.br/web/produtos/aguadereuso/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

TEIXEIRA, S. Frango de Corte: tratamento de resíduos nos abatedouros. **In: CENTRO DE PRODUÇÕES TÉCNICAS (CPT) (org.)**. [S. /], 2015. Disponível em: <https://www.cpt.com.br/cursos-avicultura/artigos/frango-de-corte-tratamento-de-residuos-nos-abatedouros>. Acesso em: 28 ago. 2024.

THE NATURE CONSERVANCY BRASIL. **Pesquisa pública: Água 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/conecte-se/comunicacao/artigos-e-estudos/pesquisa-publica-agua-2024/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

TRATAMENTO DE ÁGUA. **Água de reúso**: aplicações, vantagens e desafios. Tratamento de Água, São Paulo, 1 out. 2024. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/agua-de-reuso-aplicacoes-vantagens-desafios/>. Acesso em: 25 abr. 2025.

UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos, 2017**: águas residuais: o recurso inexplorado – resumo executivo. Paris: UNESCO, 2017. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>. Acesso em: 17 abr. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Guidelines for Water Reuse**. Washington, D.C.: USEPA, 2012. EPA/600/R-12/618. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.

VASCONCELOS, R. C. **Tratamento de efluentes líquidos** [livro eletrônico]: uma perspectiva para o desenvolvimento sustentável / Raylan Caminha de Vasconcelos. – Campina Grande: Editora Ampla, 2020. Acesso em: 1 nov. 2024.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014. Acesso em: 15 dez. 2024.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions**. London: IWA Publishing, 2017. Acesso em: 15 dez. 2024.

YU, T. *et al.* Recent progress of adsorptive ultrafiltration membranes in water treatment – A mini review. **Membranes**, v. 12, n. 5, p. 519, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12050519>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ZHANG, J. *et al.* Reduction of ultrafiltration membrane fouling by the pretreatment removal of emerging pollutants: a review. **Membranes (Basel)**, v. 13, n. 1, p. 77, 2023. DOI: 10.3390/membranes13010077. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9862110/>. Acesso em: 1 maio 2025.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE CACHAÇAS ARTESANAIS PRODUZIDAS NA MICRORREGIÃO DE ERECHIM

Marcos Luis Morgan¹, Luciana Dornelles Venquiaruto²

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Química/ (URI) – marcosmorgan2002@gmail.com

² Profa. Dra. do Curso de Engenharia Química/Alimentos (URI) – venquiaruto@uricer.edu.br

RESUMO: Cachaça é um produto tipicamente brasileiro e apresenta grande importância econômica e cultural. O presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade físico-química da cachaça artesanal produzida por agricultores camponeses da microrregião de Erechim, no Rio Grande do Sul, com ênfase na determinação do teor alcoólico, acidez volátil e concentração de cobre. Foram analisadas oito amostras coletadas diretamente em propriedades rurais que utilizam alambiques de cobre. Os resultados demonstraram que sete amostras (87,5%) apresentaram teor alcoólico dentro da faixa permitida pela legislação (38% a 48% v/v), enquanto uma apresentou valor inferior (36% v/v). Em relação ao teor de cobre, apenas uma amostra (12,5%) ultrapassou o limite máximo estabelecido (5,0 mg/L), atingindo 10,981 mg/L. Já quanto à acidez volátil, duas amostras (25%) apresentaram valores acima do permitido, sugerindo falhas nos processos fermentativos. Observou-se ainda uma possível relação entre acidez elevada e maior presença de cobre, o que reforça a importância da manutenção adequada dos alambiques. Conclui-se que, embora a maioria das amostras esteja em conformidade com os padrões legais, persistem fragilidades técnicas no processo produtivo artesanal, apontando para a necessidade de capacitação e apoio técnico aos pequenos produtores.

Palavras-chave: cachaça artesanal; alambique; teor alcoólico; acidez; teor de cobre.

Introdução

A cachaça é a aguardente típica e exclusiva do Brasil, produzida a partir da destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, apresentando graduação alcoólica entre 38% e 48% em volume, conforme regulamentação vigente (Brasil, 2022).

A produção artesanal de cachaça, especialmente realizada por agricultores camponeses em pequena escala, ainda é bastante representativa em diversas regiões do país, sendo responsável por grande parte do consumo local e, em alguns casos, pela comercialização direta a comerciantes e consumidores finais (Alcarde, Monteiro, Belluco, 2012; SEBRAE, 2017). As cachaças industriais são controladas por empresas e a cana-de-açúcar é cultivada em grandes áreas, enquanto a pinga artesanal é produzida em pequena escala por pequenos produtores, em sua maioria utilizando mão-de-obra familiar. Estima-se que existam por volta de 40 mil produtores de cachaça artesanal no Brasil (Sakai, Silva, Carvalho, 2025).

Este processo envolve etapas que vão desde a colheita, que pode ser manual ou mecanizada, até a fermentação e destilação, que requerem atenção especial para garantir a qualidade do produto final, como demonstra a Figura 1.

Figura 1. Esquema de produção de cachaça artesanal



Fonte: Autores, 2025.

A fermentação geralmente ocorre com a utilização de leveduras do gênero *Saccharomyces cerevisiae*, cuja seleção influencia diretamente as características

sensoriais e químicas da bebida (Moura *et al.*, 2020). Na destilação, o corte correto das frações - cabeça, coração e cauda - é fundamental para evitar a presença de compostos indesejáveis como o metanol e para assegurar o teor alcoólico adequado (Bertolino, 2023).

A qualidade da cachaça artesanal também está diretamente relacionada ao controle dos parâmetros físico-químicos, entre os quais destacamos o teor alcoólico, a acidez volátil e a concentração de metais, especialmente o cobre. Este último é um contaminante comum devido ao uso de alambiques de cobre, cuja higienização inadequada pode levar à contaminação do produto final, colocando em risco a saúde do consumidor (Silva, Bastos, Costa, 2021; Venquiaruto *et al.*, 2021). A ingestão excessiva de cobre pode provocar efeitos adversos agudos e crônicos nos consumidores, incluindo distúrbios gastrointestinais, danos hepáticos e neurológicos (Azevedo *et al.*, 2003; Eckhert, 2014).

A produção artesanal de cachaça enfrenta desafios para garantir a padronização e segurança do produto, principalmente devido à diversidade dos processos produtivos e à ausência de monitoramento contínuo em muitas localidades. Estudos recentes indicam que, apesar de grande parte das amostras estarem dentro dos padrões estabelecidos pela legislação, há registros frequentes de níveis elevados de cobre e variações significativas em parâmetros como acidez volátil e teor alcoólico (Marinho *et al.*, 2010; Alencar, 2021; Souza *et al.*, 2019). Estes aspectos destacam a importância de pesquisas que visem identificar e controlar as variabilidades e riscos associados à produção artesanal, buscando assegurar a qualidade da cachaça.

Diante deste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade físico-química da cachaça artesanal produzida por agricultores camponeses na microrregião de Erechim, Rio Grande do Sul, com ênfase na determinação do teor de cobre, teor alcoólico e acidez volátil. A relevância desta pesquisa está na contribuição para o aprimoramento dos processos produtivos locais, fornecendo subsídios técnicos para o fortalecimento da produção artesanal, promoção da saúde pública e valorização de uma bebida que faz parte da cultura brasileira.

Metodologia

Foram coletadas oito (8) amostras de cachaça artesanais de alambique na microrregião de Erechim/RS, sendo que as amostras foram adquiridas diretamente na propriedade dos agricultores camponeses. Os produtores que foram selecionados para participar da presente pesquisa se caracterizam por serem reconhecidos em suas comunidades pela produção de cachaça em alambiques de cobre (Figura 2), e que se dispuseram, voluntariamente, a

participar da pesquisa. A coleta das amostras foi realizada diretamente nas propriedades rurais, entre janeiro e abril de 2025, abrangendo os municípios de Erechim, Itatiba do Sul, Gaurama, Três Arroios e Erval Grande. Destaca-se que, em Itatiba do Sul e Erval Grande, foram coletadas mais de uma amostra devido à forte representatividade de produtores de cachaça nesses municípios.

Figura 2. Alambique de cobre



Fonte: Autores, 2025.

Ressalta-se que as cachaças adquiridas foram coletadas em frascos de polietileno transparente e foram vedadas com papel filmes. De acordo com o Instituto Adolfo Lutz (2008), para análises de metais não é recomendável utilizar vidro para armazenar as amostras, pois este adsorve os metais em suas paredes, sendo mais adequado se utilizar recipientes de polietileno. Logo após a coleta foram armazenadas a temperatura ambiente (20°C), dentro de uma caixa de isopor para evitar exposição a luz solar, no laboratório de Química Analítica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões- Campus Erechim.

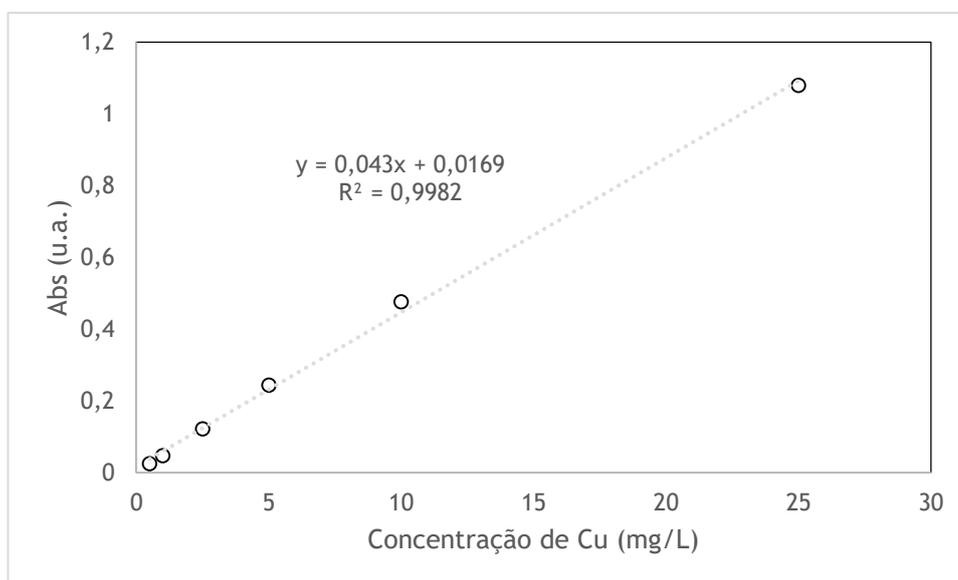
As análises das amostras foram realizadas no mês de abril de 2025 seguindo as metodologias descritas pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), sendo o método densimétrico para o teor alcoólico, método espectrofotométrico para

quantificação do teor de cobre e para a acidez volátil utilização do método titulométrico.

A graduação alcoólica foi realizada pelo método de densidade onde foi utilizado o densímetro alcoômetro (escala de 0 a 100 °GL) para medir o percentual de etanol presente nas cachaças. A temperatura foi medida com termômetro de mercúrio, e os valores corrigidos a 20 °C para comparação. Os resultados foram expressos em porcentagem em volume (% v). O grau GL (°GL) e a porcentagem em volume (% vol.) representam a mesma coisa, isto é, a fração do percentual em volume do álcool puro existente no volume da mistura.

Já para a quantificação de cobre presente nas cachaças foi utilizada por meio de medidas espectrofotométricas, em espectrômetro de absorção atômica com atomização em chama (GBC Scientific Equipment, modelo AvantAA) em 327,4nm, fenda 0,2, mistura gasosa acetileno/ ar comprimido e lâmpada de cobre. As quantidades de cobre foram determinadas por comparação das absorbâncias observadas nas amostras de cachaça, com valores de absorbância referentes a uma curva de calibração previamente construída a partir de solução estoque 100 mg.L⁻¹ de cobre, em solução etanólica 40% em concentrações de 0,5 mg.L⁻¹, 1,0 mg.L⁻¹, 2,5 mg.L⁻¹, 5,0 mg.L⁻¹, 10,0 mg.L⁻¹ e 25,0 mg.L⁻¹. A curva de calibração foi construída e apresenta-se representada na Figura 3:

Figura 3. Curva de Calibração do Cobre



Fonte: Autores, 2025

Para a quantificação da acidez volátil foi realizada o método titulométrico, que consiste em pipetar 10 mL de amostra de cachaça em um enlermeyer,

adicionado de 50 mL de água, com adição de 3 gotas de fenolftaleína. Após realizar essa solução, a mesma foi titulada com solução de hidróxido de sódio 0,1 M. Realizando os testes em triplicata, foi coletados os resultados e inseridos dentro da Equação 1, descrita pelo Instituto Adolfo Lutz:

$$\frac{V*f*100}{P*c} = \textit{acidez volátil} \quad (1)$$

Onde:

V = nº de mL de hidróxido de sódio gasto na titulação;

f = fator de correção;

P = nº de gramas de amostra usado na titulação;

c = correção para solução de NaOH, neste caso usado 10 para solução de NaOH 1M.

Para o fator de correção (f), foi realizado uma titulação com biftalato de potássio, secado em cadinhos de porcelana, na estufa Fanem, modelo 320-SE, à 105°C por 1 hora e meia, após sendo incorporada água e fenolftaleína, sendo submetida a titulação com NaOH, conforme metodologia descrita no Manual de Procedimento Operacional Padrão, publicado pela Universidade Católica de Brasília (Sodre, 2022). Assim, o fator de correção é descrito pela Equação 2:

$$f = \frac{g}{M*v} \quad (2)$$

Onde:

g = gramas utilizadas de biftalato de potássio (0,500 g);

M = massa molar do biftalato de potássio (204,22 g);

v = volume médio gasto de titulante (0,0243 L);

Dessa forma, obteve-se valor de correção (f) igual a 0,100. As análises foram realizadas em triplicata.

Resultados e discussões

Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 1, evidenciam aspectos relevantes quanto à conformidade das cachaças artesanais com os padrões estabelecidos pela legislação brasileira. Além disso, os dados analisados revelam questões técnicas associadas à produção em pequena escala, característica

marcante do modo de vida dos agricultores camponeses que produzem cachaça como forma de complementar a renda familiar.

Tabela 1. Teores de cobre, teor alcóolico e acidez volátil em cachaças artesanais

Amostra	Teor de Cobre (mg/L)	Acidez volátil (v/m) ^a	Teor alcóolico (%, v/v) ^a
1	10,981	130 ±6	43
2	3,852	205 ±15	41
3	2,219	140 ±6	41
4	2,052	176 ±6	45
5	3,599	140 ±6	36
6	1,021	180 ±17	40
7	2,781	82 ±15	43
8	4,029	150 ±6	43

^a análise realizada a 20 °C.

Em relação ao teor alcóolico, sete das oito amostras apresentaram-se dentro da faixa permitida de 38% a 48% (v/v a 20 °C), conforme estabelecido pela Instrução Normativa MAPA nº 13/2005 (Brasil, 2005). Apenas a amostra nº 5, oriunda de Erval Grande, apresentou valor inferior (36% v/v), caracterizando não conformidade. Essa situação pode estar relacionada a perdas durante a estocagem, falhas na destilação ou até mesmo erro no corte das frações, situações comuns na produção artesanal sem controle técnico rigoroso (Oliveira *et al.*, 2020).

No que se refere ao teor de cobre, a amostra nº 1 apresentou um valor muito acima do limite máximo estabelecido pela legislação (10,981 mg.L⁻¹, frente ao limite de 5,0 mg/L), o que chama atenção quanto a possíveis riscos toxicológicos associados. O cobre, embora presente em concentrações traço no organismo, pode ser prejudicial em excesso, provocando náuseas, dores abdominais e até distúrbios hepáticos em exposições prolongadas (Ribeiro; Machado, 2018). Sua presença elevada nas bebidas destiladas está

frequentemente associada ao uso de alambiques de cobre com acúmulo de resíduos, corrosão ou má manutenção (Silva *et al.*, 2015).

Salienta-se que a presença do cobre em cachaças ocorre na etapa de destilação, uma vez que o metal constituinte do alambique, quando exposto ao ar úmido, contendo gás carbônico, lentamente se oxida, ficando coberto por uma camada esverdeada, formada pelo carbonato básico de cobre, $(\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2)$, popularmente conhecido como “azinhavre”. Esta camada é então dissolvida pelos vapores alcoólicos ácidos, gerados durante o processo de destilação da cachaça, o que acaba contaminando o produto (Marinho, Rodrigues e Siqueira, 2009; Venquiaruto *et al.*, 2021). Estudos realizados por Vilela *et al.* (2007), Miranda *et al.* (2007) também apontam essa desconformidade para o teor de cobre em cachaças quando comparados com a Legislação.

Adicionalmente, observou-se que duas amostras (nº 2 e nº 4, ambas de Itatiba) ultrapassaram o limite máximo permitido de acidez volátil (205 e 176 v/m, respectivamente). A acidez volátil elevada geralmente é indicativa de fermentações descontroladas, má qualidade da matéria-prima ou tempo excessivo entre moagem e destilação, favorecendo a ação de microrganismos indesejáveis e a formação de ácidos orgânicos, como ácido acético (Costa *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2017). Autores como Junior *et al.* (2008), Schmidt *et al.* (2009), Vilela *et al.* (2007), Miranda *et al.* (2007), ao realizarem análise em relação ao teor de acidez de cachaças, também constataram que algumas amostras estavam fora dos padrões estabelecidos.

Além da análise individual dos parâmetros físico-químicos, buscou-se avaliar a possível relação entre a acidez volátil e o teor de cobre. Embora os dados não revelem uma correlação linear direta entre esses dois componentes, amostras com acidez elevada também apresentaram concentrações significativas de cobre. Isso está em conformidade com observações já descritas na literatura, que indicam que meios mais ácidos favorecem a lixiviação de cobre dos alambiques, sobretudo quando há acúmulo de resíduos ou falta de higienização adequada (Silva *et al.*, 2015). Durante a destilação, os ácidos presentes podem reagir com o cobre metálico, formando complexos solúveis que são arrastados junto ao destilado (Ribeiro; Machado, 2018). Em contextos artesanais e campestres, a ausência de manutenção regular nos alambiques intensifica esse processo corrosivo (Gonçalves *et al.*, 2022).

Portanto, a acidez elevada não é o único fator responsável pelo aumento do cobre, mas atua como um facilitador, sendo um indicador relevante de possíveis falhas nos processos fermentativos e na condução da destilação. A correlação entre esses parâmetros reforça a importância de medidas integradas de controle, que envolvam desde o monitoramento da qualidade da garapa até a limpeza e inspeção dos equipamentos utilizados.

De forma geral, a maioria das amostras analisadas encontra-se dentro dos padrões estabelecidos pela legislação vigente. No entanto, as não conformidades identificadas apontam fragilidades na cadeia produtiva, frequentemente marcadas pela ausência de assistência técnica, uso de tecnologias rudimentares e dificuldades de acesso a capacitações continuadas (Pereira *et al.*, 2021).

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam que a maioria das amostras de cachaça artesanal analisadas encontra-se em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação brasileira quanto ao teor alcoólico, acidez volátil e concentração de cobre. No entanto, a identificação de não conformidades pontuais, como a presença de cobre acima do limite permitido e acidez volátil excessiva em algumas amostras, revela fragilidades técnicas no processo de produção, que podem comprometer a qualidade e a segurança do produto final.

Destaca-se, ainda, a relação potencial entre a acidez do mosto fermentado e a lixiviação de cobre dos alambiques, especialmente em sistemas de produção artesanal que utilizam equipamentos de cobre sem manutenção preventiva adequada. Esse achado reforça a necessidade de um olhar mais técnico e preventivo sobre os fatores que influenciam a qualidade da cachaça, valorizando o saber tradicional sem negligenciar os requisitos sanitários e normativos. Os produtores, por sua vez, não possuíam registros dessa atividade, essa atividade foi repassada entre os ancestrais sobre a fabricação.

Considerando que as unidades produtivas analisadas pertencem a agricultores camponeses, cuja produção de cachaça constitui uma importante estratégia de complementação de renda, torna-se necessário o fortalecimento de políticas públicas voltadas à qualificação da produção artesanal. Isso inclui investimentos em capacitação técnica, extensão rural, adequação sanitária das instalações e apoio à regularização legal, o que contribuirá não apenas para a melhoria da qualidade do produto, mas também para a valorização socioeconômica da agricultura familiar no Brasil.

REFERÊNCIAS

ALCARDE, A. R.; MONTEIRO, B. M. dos S.; BELLUCO, A. E. de S. Composição química de aguardentes de cana-de-açúcar fermentadas por diferentes cepas de levedura *Saccharomyces cerevisiae*. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p. 1612-1618, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000800022>

AZEVEDO, S. M. *et al.* Levantamento da contaminação por cobre nas aguardentes de cana-de-açúcar produzidas em Minas Gerais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 3, p. 462-466, 2003. DOI: 10.1590/S1413-70542003000300017.

BRASIL. Instrução Normativa nº 13, de 29 de junho de 2005. Aprova o Regulamento Técnico para fixação dos padrões de identidade e qualidade para aguardente de cana e para cachaça. **Diário oficial da União**, Brasília, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário da cachaça 2021** / Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA/AECS, 2022.

CARVALHO, J. DE. NEVES, F. F. Adoção de práticas sustentáveis como diferencial competitivo: estudo de caso de uma indústria de cachaça. **Revista Acadêmica Online** v.10, n. 51, p. 1-12, 2024. <https://doi.org/10.36238/2359-5787.2024.v10n51.114>

COSTA, P. S. *et al.* Parâmetros físico-químicos e microbiológicos na produção de cachaças artesanais no interior de Minas Gerais. **Ciência Rural**, v. 49, n. 1, p. 1-9, 2019.

CUNHA, A. de S. **Análise do mercado de cachaça artesanal no Rio Grande do Sul**. 2018. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GAMA, E. M. Caracterização físico-química da cachaça artesanal comercializada no mercado municipal de Coronel Murta-MG. **Revista Científica Multidisciplinar**, v.3, n.2, p.1-12, 2022. <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i2.1168>

GONÇALVES, L. M. *et al.* Qualidade da cachaça e o papel da assistência técnica rural. **Boletim Técnico do IFMG**, v. 12, p. 45-58, 2022.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea - São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

MACENA, S. V. H. **Acompanhamento do processo produtivo de cachaça artesanal**. 2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021.

MARINHO, A. V.; RODRIGUES, J. P. de M.; SIQUEIRA, M. I. D. de. Avaliação da acidez volátil, teor alcoólico e de cobre em cachaças artesanais. **Ciências Ambientais e Saúde (EVS)**, v. 36, n. 4, p. 785-793, 2010. DOI: 10.18224/est.v36i4.1129.

MARINHO, A. V.; RODRIGUES, M. J.; SIQUEIRA, M. I. D. Avaliação da acidez volátil, teor alcoólico e de cobre em cachaças artesanais. **Estudos**, v. 26, n. 1/2, p. 75-93, 2009.

MATOS, T. T. S. **Novas linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* e híbridos entre *S. cerevisiae* e *Saccharomyces kudriavzevii* para a produção de cerveja, cachaça e vinho**. 2021. 178 f. Tese (Doutorado em Microbiologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MELO, F. T. *et al.* Valorização da cachaça artesanal: indicação geográfica como instrumento de fortalecimento territorial. **Geografia e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 89-104, 2020.

MIRANDA, M. B.; MARTINS, N. G. S.; BELLUCO, A. E. S.; HORII, J.; ALCARDE, A. R. Qualidade química de cachaças e de aguardentes brasileiras. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 4, p. 897-901, 2007. DOI: 10.1590/S0101-20612007000400034.

OLIVEIRA, J. R. *et al.* Controle de qualidade na produção artesanal de cachaça: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Agroindústria**, v. 5, n. 2, p. 101-110, 2020.

OLIVEIRA, L. de; JUNIOR, E. F. Produção de cachaça artesanal. *Interface Tecnológica*, v. 19, n. 2, p. 1-13, 2022. DOI: 10.31510/infra.v19i2.1542.

PEREIRA, M. R. *et al.* Cachaça e agricultura familiar: práticas, saberes e políticas públicas. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, p. 113-129, 2021.

RIBEIRO, D. C.; MACHADO, M. A. Toxicidade do cobre em bebidas destiladas: aspectos regulatórios e toxicológicos. **Toxicologia Aplicada**, v. 10, n. 1, p. 33-41, 2018.

SANTOS, A. P. *et al.* Avaliação sensorial e estabilidade química de cachaças armazenadas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 19, n. 4, p. 457-468, 2017.

SAKAI, R. H.; SILVA, F. C.; CARVALHO, M. L. Cachaça. EMBRAPA, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/cachaca>.

SILVA, A. M. *et al.* Influência da manutenção dos alambiques de cobre sobre os teores metálicos em cachaças artesanais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 35, n. 3, p. 555-562, 2015.

SILVA, R. P. da *et al.* Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 2, p. 292-304, 2008. DOI: 10.1590/S0100-69162008000200010.

SODRÉ, M. **Manual de procedimento operacional padrão**. Brasília, 2022, p. 95. https://ucb2.catolica.edu.br/portal/wp-content/uploads/2023/06/POP-Ciencia-e-Tecnologia-de-Alimentos_CTA-2022.pdf

VENQUIARUTO, L. D., DALLAGO, R. M., ORO, C. E. D., VARGAS, C. E. B. Curricularização da extensão nas disciplinas de química geral e química analítica: valorização das práticas sociais de agricultores camponeses. **Vivências**, n. 17, v. 34, p. 109-119, 2021. <https://doi.org/10.31512/vivencias.v17i34.550>

VOLPE, T. C. **Avaliação das características físico-químicas da cachaça industrial e artesanal comercializadas no centro norte paranaense**. 2013. 94 f. TCC em Engenharia de Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

VILELA, F. J. *et al.* Determinação de composições físico-químicas de cachaças do sul de Minas Gerais e de suas misturas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 31, n. 4, p. 1089-1094, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400022>

TELLES, N. L. S.; FILHO, E. N. S.; AMORIM, E. L. C. Produção de hidrogênio a partir da vinhaça da cana-de-açúcar em reatores anaeróbios operados em batelada. **Revista DAE**, v. 66, n. 211, p. 74-88, 2018. DOI: 10.4322/dae.2018.015. Acesso em: 02 mar. 2025.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE HIDROMEL COM ADIÇÃO DE HIBÍSCO (*Hibiscus sabdariffa*)

Luiz Antônio Teixeira Pedott¹, Lucas Nascimento², Jamile Zeni³, Eunice Valduga⁴

¹Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI Erechim) – luizpedott1@gmail.com

²Doutorando do Curso de Engenharia de Alimentos (URI Erechim) - lucashenryque.nascimento@gmail.com

³Profª. Drª. Jamile Zeni do Curso de Engenharia Química/Alimentos (URI Erechim) - jamilezeni@uricer.edu.br

⁴Profª. Drª. Eunice Valduga do Curso de Engenharia Química/Alimentos (URI Erechim) - veunice@uricer.edu.br

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar um hidromel com adição de extrato hidroalcoólico de hibisco (*Hibiscus sabdariffa*), avaliando os impactos dessa incorporação sobre os parâmetros físico-químicos (Açúcares redutores, crescimento celular, pH, acidez total, teor alcoólico e cor: L*, a*, b* e croma C) e funcionais (Atividade antioxidante) da bebida. Inicialmente, a amostra de mel foi caracterizada em termos de sólidos solúveis totais (°Brix), acidez, umidade e hidroximetilfurfural (HMF). A fermentação alcoólica foi conduzida com a levedura *Saccharomyces cerevisiae* ICV 254 e monitorada pela cinética de crescimento celular, consumo de açúcares redutores e formação de etanol. Após estabilização coloidal e trasfega do hidromel incorporou-se 20% (v/v) de extrato de hibisco. A amostra de mel apresentou 81,8°Brix, 16,27% de umidade, 32,13 mEq ácido fórmico/kg de acidez total e 59 mg HMF/kg de hidroximetilfurfural. O hidromel com hibisco apresentou teor alcoólico de 7,2% (v/v), acidez total de 59,5 mEq/L, pH de 2,6 e parâmetros de cor L* de 38,71, a* de 6,4, revelando a presença de tonalidades avermelhadas características dos pigmentos antocianicos do hibisco. O principal diferencial observado foi a atividade antioxidante (0,031 % de captação do radical DPPH), cerca de dez vezes superior à do hidromel sem hibisco, confirmando o potencial funcional do

hibisco. Conclui-se que a adição de hibisco contribui positivamente para a funcionalidade do hidromel, mantendo a qualidade fermentativa e ampliando seu apelo como produto artesanal inovador.

Palavras-chave: hidromel; hibisco; atividade antioxidante; bebida artesanal.

Introdução

O hidromel é definido pela legislação brasileira como uma bebida alcoólica com teor entre 4 e 14% em volume a 20 °C, obtida por meio da fermentação de uma solução composta por mel de abelha, sais nutrientes e água potável (Brasil, 2012). Sua produção, no entanto, não segue um protocolo padronizado, sendo influenciada por diversos fatores como tempo e temperatura de fermentação, tipo e quantidade de levedura empregada, além dos ingredientes adicionados. Essa variabilidade impacta diretamente a qualidade sensorial e a composição físico-química da bebida, originando diferentes estilos de hidromel, especialmente quando se utilizam aditivos como frutas, ervas e especiarias (Gupta; Sharma, 2009). Com base em sua tecnologia de elaboração, o hidromel pode ser classificado como seco, doce, licoroso ou espumoso (Brasil, 2012).

Entre os ingredientes que podem ser incorporados ao hidromel, o hibisco destaca-se como uma alternativa promissora. Pertencente ao gênero *Hibiscus*, essa flor nativa da África possui diversas espécies comestíveis e é reconhecida por suas propriedades funcionais. Segundo Vizzotto & Pereira (2008), o hibisco apresenta ação antioxidante, diurética e hepatoprotetora, além de contribuir para a redução da pressão arterial, colesterol, triglicerídeos e formação de cálculos renais. Seu uso é tradicional em países asiáticos como Japão, China e Taiwan, onde é considerado um alimento funcional, sendo os cálices desidratados a parte mais comercializada, empregada na formulação de alimentos e bebidas (Maciel *et al.*, 2012).

No Brasil, embora o hidromel ainda seja uma bebida de consumo restrito, observa-se um cenário favorável à sua inserção em nichos voltados à gastronomia, ao turismo rural e ao mercado de produtos artesanais e naturais (Oliveira; Malta; Martinez, 2023). A combinação entre a tradição do hidromel e a inovação por meio da adição de ingredientes regionais e funcionais, como o hibisco, representa uma oportunidade estratégica para diversificar o setor de bebidas fermentadas e agregar valor à cadeia apícola (Santos; Sartori; Aquino, 2021).

Diante deste contexto, o objetivo do estudo foi desenvolver e caracterizar um hidromel com adição de extrato hidroalcoólico de hibisco (*Hibiscus sabdariffa*), avaliando os impactos dessa incorporação sobre os parâmetros físico-químicos (Açúcares redutores, crescimento celular, pH, acidez total, teor alcoólico

e cor: L*, a*, b* e croma C) e funcionais (Atividade antioxidante) da bebida. A proposta buscou contribuir com a valorização do hidromel artesanal, destacando o potencial funcional do hibisco como diferencial na formulação de bebidas fermentadas com identidade e apelo à saúde.

Material e Métodos

Matéria-prima

A amostra de mel, de abelhas africanas (*Apis mellifera scutellata*), predominantemente da flor de laranjeira, utilizada neste estudo foi coletada em setembro de 2022, de um produtor rural no município de Erechim/RS nas coordenadas 27°41'06"S 52°16'04"W

O hibisco utilizado na elaboração do hidromel pertence à espécie *Hibiscus sabdariffa* foi adquirido no comércio local do município de Erechim/RS.

Microvinificação do vinho de mel -hidromel

A metodologia empregada na produção de hidromel foi adaptada de Da Silva (2023). A Figura 1 apresenta um diagrama das etapas do processo de microvinificação do hidromel.

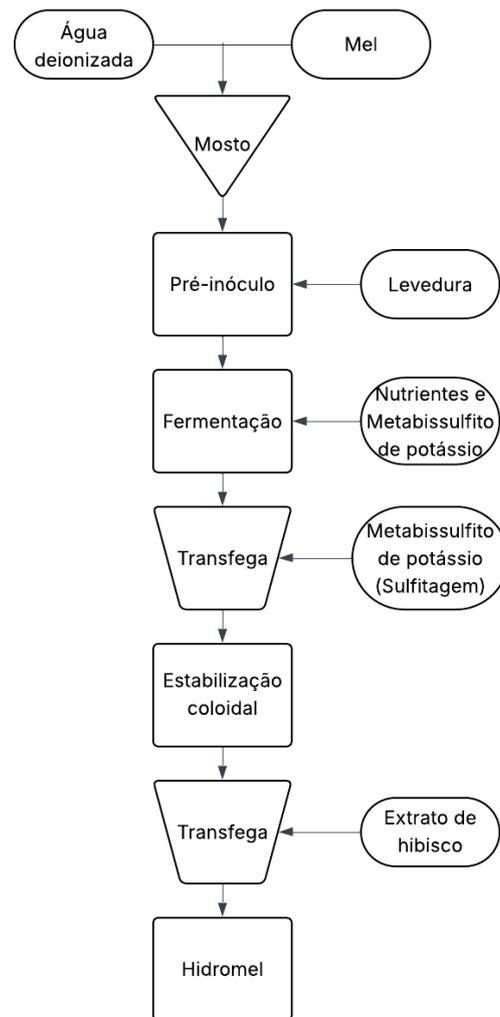
O mosto foi preparado em proporção de 3:1 de água:mel (v:m), totalizando um mosto de 24 litros com 16°brix. Posteriormente, foi realizado um pré-inóculo com uma mistura de 5% de mel em água deionizada e 6 g da levedura *Saccharomyces cerevisiae* ICV 254 (Lalvin). Após 4 h de pré-inóculo, este foi transferido para um fermentador de vidro contendo 25 L de mosto e 8 g/hL de metabissulfito de potássio. A fermentação foi conduzida em câmara refrigerada com controle de temperatura em 18°C ±2. No 1º dia da fermentação foi adicionado 10g/hL de nutriente de fermentação (vitamina B1, fosfato de amônia e extrato de levedura inativa). No segundo, terceiro e quarto dia adicionou-se 20, 15, 15 g/hL de nutriente de fermentação, respectivamente.

A fermentação alcoólica foi acompanhada mediante determinação do residual de açúcares redutores totais. Ao término da fermentação alcoólica (<1g/L de açúcares redutores totais), foi realizada a trasfega, ou seja, remoção de resíduos de fundo da dorna de fermentação de vidro, e adicionou-se 2,5 g de metabissulfito de potássio. Durante a etapa de fermentação alcoólica, também, foram monitorados o crescimento celular, o consumo de açúcares redutores e a produção de etanol, com o objetivo de obter a cinética de fermentação.

Em seguida, o produto foi subdividido em recipientes de vidro de 5 L e realizou-se a estabilização coloidal em câmara fria a 7 °C por 40 dias e

posteriormente nova trasfega, visando a decantação de substâncias coloidais. Os recipientes foram atestados com gás inerte (nitrogênio) nos espaços vazios.

Figura 1. Diagrama das etapas do processo de microvinificação do hidromel



O produto hidromel (controle) foi caracterizado quanto teor alcoólico, pH, acidez total, parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* e croma C^*) e atividade antioxidante frente ao radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH*).

Preparo do extrato de hibisco (*Hibiscus sabdariffa*)

O extrato de hibisco foi preparado utilizando solução alcóolica do hidromel, no qual utilizado uma proporção de 100 g de flores secas de hibisco para 1 L de hidromel, mantida em infusão por 10 dias em ambiente escuro e à temperatura

ambiente ($22^{\circ}\text{C}\pm 2$). Após esse período, o extrato foi filtrado em papel watmann nº1 e mantido sob refrigeração ($4^{\circ}\text{C}\pm 2$) em frasco de vidro atestado com gás inerte (nitrogênio).

Elaboração de hidromel com adição de extrato de hibisco

Na formulação de hidromel (controle) foi adicionado 20% (v/v) de extrato hidroalcolólico de hibisco. A bebida foi caracterizada quanto ao teor alcoólico, pH, acidez total, parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* e croma C^*) e atividade antioxidante frente ao radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH*).

Determinações analíticas

Acidez total

A acidez total do mel e do hidromel foi determinada conforme o método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008), com adaptações. Inicialmente, pesou-se 2 g da amostra de mel em um erlenmeyer de 250 mL, seguido da adição de 50 mL de água. A mistura foi então agitada e após ser homogenizada foi deposto 2 gotas de solução de fenolftaleína a 1%. Na etapa seguinte, procedeu-se à titulação com solução de hidróxido de sódio 0,01 mol/L, até que a coloração rósea se estabelecesse (mantendo o pH entre 8,2 e 8,41).

Para determinar a acidez do hidromel, 50 mL da amostra foram transferidos para um erlenmeyer de 250 mL, e em seguida foi inserido um eletrodo de medidor de pH previamente calibrado. A titulação foi conduzida com solução de hidróxido de sódio 0,1 M, sendo finalizada ao atingir pH entre 8,2 e 8,4. A acidez total foi expressa em mEq/L de ácido equivalente (ácido fórmico).

pH

O pH foi determinado utilizando-se um medidor de pH Tec-7 (Tecnal), previamente calibrado com tampões comerciais de pH 4,0 e 7,0, em temperatura entre 20 e 25 °C, e com sensibilidade superior a 90%. O eletrodo foi mergulhado na amostra (que se encontrava na mesma faixa de temperatura das soluções tampão), e o valor do pH foi anotado após a estabilização da leitura. O eletrodo foi lavado com água destilada antes e depois da calibração em cada tampão, bem como antes e depois da leitura de cada amostra.

Umidade

A determinação da umidade do mel foi realizada por meio do método indireto mediante leitura do índice de refração a 20 °C e tabela de Chataway (IAL, 2008).

Hidroximetilfurfural (HMF)

Inicialmente, 5 g da amostra foi misturada com 25 mL de água e transferida para um balão volumétrico de 50 mL. Em seguida, adicionou-se 0,50 mL da solução de Carrez 1 (15 g de $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ em 100 mL de H_2O) e 0,50 mL da solução de Carrez 2 (30 g de $Zn(OAc)_2 \cdot 2H_2O$ em 100 mL de H_2O). Posteriormente, o volume foi completado com água destilada. A amostra foi filtrada em papel filtro Watman nº1, descartando-se os primeiros 10 mL do filtrado. Em seguida, 5 mL do filtrado foram adicionados em dois tubos de ensaio (18 x 150 mm), no primeiro, adicionou-se 5 mL de água, e no segundo tudo de ensaio (referencia) adicionou-se 5 mL de solução de matabissulfito de sódio (0,10 g de $NaHSO_3$ em 100 mL de H_2O). Ambos os tubos foram agitados em Vortex e realizada a leitura da absorbância em espectrofotômetro nos comprimentos de onda 284 nm e 336 nm (IAL, 2008).

Brix

A determinação dos °Brix à 20°C foi realizada utilizando um refratômetro de Abbe de bancada (BioBrix).

Açúcares redutores totais - ART

A determinação das concentrações de glicose e frutose foi realizada pelo método DNS- ácido 3,5-dinitrosalicílico (Miller, 1959), com adaptações. Inicialmente foram preparadas soluções de glicose nas concentrações de 0,1 a 1,0 g/L para a construção da curva de calibração. A determinação da concentração de açúcares redutores só pode ser efetuada após centrifugação (9000 rpm por 5 min) visando eliminar a interferência da biomassa.

Uma alíquota de 1 mL do sobrenadante do centrifugado foi transferida para um balão volumétrico de 10 mL este foi completo e homogeneizado (as diluições também tiveram que ser ajustadas conforme o consumo de açúcar progredia). Deste foi retirado 1 mL, transferido para um tubo de ensaio grande e a ele foi acrescentado 1 ml de DNS (o branco foi realizado substituindo a amostra por água destilada), as amostras foram levadas à fervura por 8 min, seguido de banho de gelo por 8 min, a elas adicionou-se 16 mL de tartarato duplo sódio/potássio

que foram homogeneizadas e por fim realizou-se uma leitura em espectrofotômetro a 540 nm.

Concentração celular

O método a utiliza a dependência espectrofotométrica da absorbância como uma função da concentração de células de levedura, e foi adaptado de Silva *et al.* (2016). Antes de iniciar a fermentação foram preparadas suspensões, em água, de levedura comercial em diferentes concentrações (1 a 35 g/L) para a construção de uma curva de calibração com a absorbância das suspensões medida em espectrofotômetro a um comprimento de onda de 600 nm, o equipamento foi zerado utilizando água destilada. Para a cinética, alíquotas de 1 mL de fermentado foram retiradas em diferentes tempos e submetidas a leitura em espectrofotômetro a 600 nm frente a um branco (meio de fermentação antes do inóculo).

Teor alcóolico

O teor alcoólico das amostras foi determinado empregando o método do Ebulliômetro Dujardin Salleron (IAL, 2008), utilizando o equipamento Ebulliômetro 3300 (Metalúrgica Leonardo Ltda).

Atividade antioxidante frente ao radical DPPH*

A metodologia de avaliação da atividade antioxidante pelo método DPPH* consiste na medida da extinção da absorção do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH*) em 515 nm (Brand-Williams, Cuvelier e Berset, 1995). Para tanto foram utilizadas alíquotas de 1 mL do fermentado que em seguida foi misturado com 1 mL de solução etanoica de DPPH* 0,1 mM (Sigma-Aldrich), agitado e incubado na ausência de luz por 30 minutos a temperatura ambiente. As leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Visível (Logen Scientific, LS-7052-BIV) em 515 nm. O equipamento foi zerado utilizando etanol 50% e o controle foi realizado com 1 mL de etanol 50% e 1 mL da solução de DPPH*. Para evitar problemas com cor, soluções de extrato preparadas nas mesmas concentrações da análise. Em seguida 1 mL dessas soluções foram misturadas com 1 mL de etanol absoluto. A mistura foi incubada por 30 min em temperatura ambiente e a leitura foi realizada em 515 nm (este valor foi considerado o "branco"). O percentual de captação do radical DPPH foi calculado em termos da porcentagem de atividade antioxidante (AA%), de acordo com a Equação 1.

$$AA\% = 100 - \frac{[(Abs.amostra - Abs.branco) * 100]}{Abs.controle} \quad (Eq. 1)$$

Parâmetros de Cor (L^* , a^* e b^*)

Os parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) foram medidos através de colorímetro (Minolta Chroma Meter, modelo CR-400), em sistema CIELAB. Onde L^* é a luminosidade ou brilho (que pode variar de 0 – preto – a 100 – branco), a coordenada de cromaticidade a^* pode variar de $-a^*$ (verde) até $+a^*$ (vermelho) e a cromaticidade b^* que pode variar de $-b^*$ (azul) até $+b$ (amarelo) e croma C^* , utilizando a Equação 2. As avaliações foram realizadas com 25 mL de líquido, leitura realizada em altura de 2,5 cm com cone aberto com ângulo de 45° e iluminante de 45° .

$$Croma C^* = [(a^{*2} + b^{*2})]^{1/2} \quad (Eq. 2)$$

Tratamento dos dados

Os resultados ($n = 3$) das análises físico-químicas das amostras das bebidas foram tratados estatisticamente pela análise de variância - ANOVA e a comparação das médias pelo teste t-student com auxílio do software STATISTICA versão 5.0 (StatSoft/Dell, USA), com 95% de confiança. As curvas analíticas, como as utilizadas para a determinação de açúcares redutores e atividade antioxidante, foram construídas a partir de regressão linear, utilizando o software Microsoft Excel®. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos às curvas de calibração.

Resultados e discussões

Caracterização do mel

Para a acidez foi observado um valor de 32,13 mEq/kg, estando abaixo do limite máximo permitido de 50 mEq/kg, conforme estabelecido pela legislação vigente (Brasil, 2000). Quanto à umidade, registrou-se um teor de 16,27%, valor também dentro do limite legal de até 20% (Brasil, 2000). Por outro lado, o teor de hidroximetilfurfural (HMF), que mede o escurecimento do mel, foi de 59 mg/kg, estando próximo ao limite máximo de 60 mg/kg determinado pelo regulamento técnico de identidade e qualidade do mel, um resultado já esperado, considerando a data de coleta da amostra. As análises de sólidos solúveis indicaram uma média de 81,8 °Brix.

Cinética da fermentação alcoólica e caracterização do hidromel

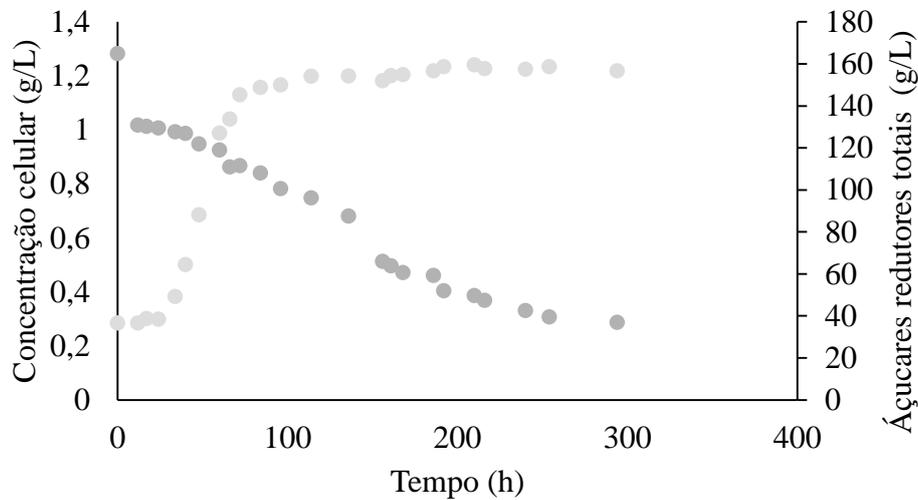
A Figura 2 apresenta o aspecto visual do hidromel (controle) durante a fermentação, antes da etapa de clarificação.

Figura 2. Aspecto visual do hidromel durante a fermentação



Na Figura 3, observa-se que a concentração de biomassa aumentou expressivamente nas primeiras 70 a 100 h de fermentação, saindo de aproximadamente 0,2 g/L e alcançando um patamar em torno de 1,3 g/L, no qual se manteve até o final do processo. Esse comportamento reflete o padrão clássico da cinética microbiana, com uma fase *lag* inicial (adaptação das leveduras ao meio), seguida por uma fase logarítmica (exponencial) de intenso crescimento celular e, por fim, uma fase estacionária, caracterizada pela estabilização da população microbiana. A interrupção do crescimento celular, mesmo na presença de açúcares residuais, pode ser atribuída a fatores limitantes no meio, como a escassez de nutrientes essenciais (principalmente fontes de nitrogênio), ou à inibição metabólica provocada pelo acúmulo de etanol e outros metabólitos secundários, comuns em fermentações alcoólicas.

Figura 3. Cinética da fermentação alcoólica do hidromel em termos de concentração celular e consumo de açúcares redutores totais

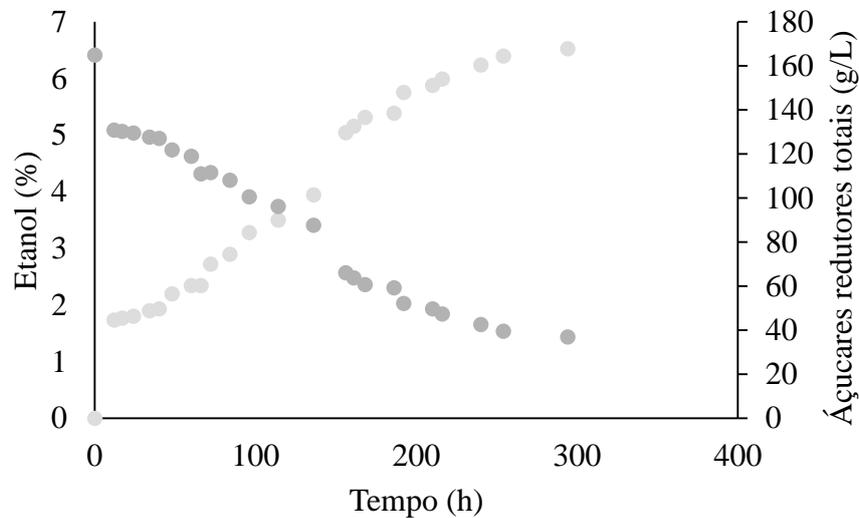


Simultaneamente, a concentração de açúcares redutores totais sofreu uma redução gradual e contínua ao longo do processo fermentativo. A partir de uma concentração inicial próxima de 160 g/L, os açúcares foram progressivamente consumidos, atingindo cerca de 40 g/L ao final da fermentação. Esse perfil evidencia a utilização eficiente dos carboidratos pelas leveduras, tanto como fonte de carbono para o crescimento celular quanto como substrato energético para a produção de etanol e outros compostos metabólicos. O consumo residual observado nas etapas finais pode estar associado à diminuição da atividade enzimática ou à perda de viabilidade celular, reflexo das condições ambientais adversas impostas ao longo do processo.

Esse conjunto de dados confirma que a fermentação ocorreu de forma satisfatória, com cinética compatível com a literatura para sistemas fermentativos baseados em mostos com elevada concentração de açúcares. Além disso, a estabilização da biomassa e a desaceleração do consumo de substrato nas últimas horas indicam o ponto de esgotamento fermentativo, informação crucial para a determinação do tempo ótimo de processo em escala artesanal ou industrial.

A Figura 4 apresenta a evolução da concentração de etanol ao longo do tempo de fermentação, acompanhada do consumo de açúcares redutores totais. Observa-se que o etanol, inicialmente ausente no meio fermentativo, começou a ser detectado já nas primeiras horas do processo, com um aumento contínuo e expressivo até cerca de 300 horas, atingindo uma concentração final aproximada de 7,2% (v/v). Esse valor está dentro da faixa típica para hidroméis artesanais (geralmente entre 6% e 12% v/v), conforme definido pela legislação brasileira (MAPA, 2012), e evidencia a eficiência fermentativa do sistema empregado.

Figura 4. Cinética da fermentação alcoólica do hidromel em termos de formação de etanol e consumo de açúcares redutores totais



O perfil da curva demonstra uma **fermentação ativa e progressiva**, sugerindo que as leveduras foram capazes de metabolizar os açúcares disponíveis de forma eficiente, mesmo ao longo de um processo relativamente prolongado. A formação de etanol mostra uma **correlação inversa clara com a concentração de açúcares redutores**, que diminuiu gradualmente de aproximadamente **160 g/L para cerca de 40 g/L**, reforçando a conversão fermentativa dos carboidratos em etanol e outros produtos secundários.

Esse comportamento confirma os dados observados anteriormente na Figura 3, onde o crescimento celular das leveduras coincidiu com o consumo de açúcares, e agora, com a produção proporcional de etanol, valida-se a eficiência global do processo fermentativo. O padrão apresentado é típico de fermentações conduzidas por leveduras do gênero *Saccharomyces*, sob condições adequadas de temperatura, pH e nutrientes, compatíveis com a produção de hidromel.

Além disso, os parâmetros físico-químicos finais do produto, como o pH de 2,7 e a acidez total de 59,5 mEq/L, indicam um produto com caráter marcadamente ácido, o que contribui para sua estabilidade microbiológica e para um perfil sensorial mais refrescante. A acidez, combinada com a presença de compostos como taninos e ácidos orgânicos, confere ao hidromel complexidade de sabor e boa aceitação potencial em nichos que valorizam bebidas com identidade regional e atributos funcionais.

Conforme apresentado na Tabela 1, a adição de hibisco ao hidromel promoveu alterações relevantes nos parâmetros físico-químicos e visuais da bebida. Em relação ao pH, observou-se uma ligeira redução de 2,7 no hidromel controle para 2,6 na amostra com hibisco, acompanhada por um aumento

significativo na acidez total, que passou de 33,44 para 59,51 mEq/L. Esse aumento pode ser atribuído à presença de compostos ácidos naturais do hibisco, como os ácidos orgânicos, que intensificam o caráter ácido da bebida. Um pH mais baixo e uma acidez mais elevada favorecem a estabilidade microbiológica do produto e conferem ao hidromel um perfil sensorial mais refrescante e marcante.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos do hidromel controle e do hidromel com adição de hibisco

Determinações	Amostras		
	Hidromel (controle)	Hidromel com hibisco	
pH	2,7 ^a ±0,07	2,6 ^a ±0,08	
Acidez total (mEq/L)	33,44 ^b ±1,03	59,51 ^a ±2,9	
Teor alcoólico (% v/v)	7,2 ^a ±0,18	7,2 ^a ±0,22	
Parâmetros de Cor	L*	51,39 ^a ±2,05	38,71 ^b ±1,16
	a*	-3,16 ^b ±0,09	6,4 ^a ±0,19
	b*	11,59 ^a ±0,35	6,2 ^b ±0,24
	croma (C)*	12,01 ^a ±0,36	8,9 ^b ±0,27
AA (%)	0,326 ^a ±0,009	0,031 ^b ±0,0001	

*média (n = 3) ± desvio padrão, seguidas de letras iguais/linhas indicam não haver diferença significativa a nível de 5% (Teste t-student).

O teor alcoólico foi semelhante em ambas as amostras, atingindo 7,2% v/v, o que indica que a adição de hibisco não comprometeu a eficiência da fermentação alcoólica. Esse resultado demonstra que os compostos presentes na planta não exerceram efeito inibitório sobre as leveduras utilizadas no processo, mantendo a conversão adequada dos açúcares em etanol.

Quanto à coloração, houve mudanças perceptíveis que evidenciam a contribuição do hibisco para a aparência final do produto. O hidromel controle apresentou maior luminosidade ($L^* = 51,39$) e valor negativo de a^* (-3,16), indicando tonalidades mais claras e esverdeadas. Já o hidromel com hibisco apresentou menor luminosidade ($L^* = 38,71$) e valor positivo de a^* (6,4), revelando a presença de tonalidades avermelhadas características dos pigmentos naturais do hibisco, como as antocianinas. O parâmetro b^* também foi reduzido (de 11,59 para 6,2), indicando uma diminuição das tonalidades amareladas,

enquanto o croma (C^*) caiu de 12,01 para 8,9, sugerindo uma cor mais escura e menos saturada, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5. Aspecto visual do hidromel controle (a) e com extrato de hibisco (b)



Ambos os hidromeis apresentaram atividade antioxidante, amostra contendo extrato de hibisco apresentou uma atividade antioxidante expressivamente superior, com coeficiente angular (inclinação) da reta igual a 1418,3, e coeficiente de determinação $R^2 = 0,9638$, indicando boa linearidade da resposta. Por outro lado, a amostra padrão (sem hibisco) apresentou uma inclinação significativamente menor, de 136,0, com $R^2 = 0,9743$. O resultado mostra que a amostra com o extrato de hibisco, foi necessário 10 vezes menos produto para neutralizar o reagente de DPPH, ou seja, ela é 10 vezes mais eficaz do que o hidromel controle.

Considerações Finais

O presente estudo demonstrou que a adição de extrato de hibisco ao hidromel é uma estratégia viável para o desenvolvimento de uma bebida fermentada com maior valor agregado, tanto do ponto de vista funcional quanto sensorial. A cinética da fermentação alcoólica mostrou que a presença do hibisco não interferiu negativamente na atividade fermentativa das leveduras, uma vez que o teor alcoólico final foi equivalente ao do hidromel controle (7,2% v/v), indicando conversão eficiente dos açúcares em etanol.

Do ponto de vista físico-químico, observou-se que o hidromel com hibisco apresentou maior acidez titulável e menor pH, características desejáveis para a estabilidade microbiológica e a conservação do produto. Além disso, os parâmetros de cor revelaram uma significativa alteração visual, com redução da luminosidade e predominância de tonalidades avermelhadas, conferindo ao produto um aspecto mais atrativo e diferenciador no mercado.

O principal destaque, no entanto, foi o aumento expressivo da atividade antioxidante na amostra com hibisco, o que evidencia o potencial funcional desse ingrediente natural. Esse resultado reforça o papel do hibisco não apenas como agente corante natural, mas também como fonte de compostos bioativos capazes de agregar benefícios à saúde do consumidor.

Dessa forma, conclui-se que a formulação de hidromel com adição de hibisco representa uma alternativa promissora para a diversificação de bebidas fermentadas artesanais, contribuindo para a valorização do mel como matéria-prima e atendendo à crescente demanda por produtos naturais, inovadores e com apelo funcional. Estudos futuros podem explorar a aceitação sensorial do produto e a estabilidade desses atributos ao longo do tempo de armazenamento, ampliando o potencial de inserção no mercado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. *et al.* Acompanhamento da fermentação na produção de hidromel com utilização de *Saccharomyces cerevisiae* e *Saccharomyces boulardii*. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 2, p. 56-64, 2021.

BORGES, J. P. *Hidromel: produção, desafios e perspectivas futuras*. 2021. 58 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Paulo, Campus Diadema, Diadema, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Abastecimento. Instrução Normativa nº 11, de 20 de outubro de 2000. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade do Mel. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, 23 out. 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 34, de 29 de novembro de 2012. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade das bebidas fermentadas: fermentado de fruta; fermentado de fruta licoroso; fermentado de fruta composto; sidra; hidromel; fermentado de cana; saquê ou sake. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, p. 3, 23 nov. 2012.

CAMARGO, G. D. V. G.; VIEIRA, R. C. Hidromel: processo de produção e predisposição da bebida no Brasil. **Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, Jaboticabal, v. 15, n. 1, e1511, 2023.

D'AMORE, T. *et al.* A study of ethanol tolerance in yeast. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 9, n. 4, 1990.

DANTAS, C. E. A. **Produção e caracterização de hidroméis elaborados a partir de méis de abelha africanizada (*Apis mellifera*) e jandaíra (*Melipona subnitida*) produzidos no estado do Ceará, safra 2017**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Limoeiro do Norte, 2018.

DA SILVA, M. R.; COUTINHO, A. P. C. Produção e caracterização de diferentes tipos de hidromel. **Environmental Science & Technology Innovation**, Bauru, v. 2, n. 2, p. 304-320, 2023.

GUPTA, J. K.; SHARMA, R. Production technology and quality characteristics of mead and fruit-honey wines: a review. **Indian Journal of Natural Products and Resources**, v. 8, p. 345-355, 2009.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 4ª edição, 1018p, 2008.

LEE, S.; PARK, J. Standardization of fermentation processes using deionized water: reproducibility in alcoholic beverages. **Fermentation Science**, v. 5, e23, 2019.

MACIEL, M. J. *et al.* Avaliação do extrato alcoólico de hibisco (*Hibiscus sabdariffa* L.) como fator de proteção antibacteriana e antioxidante. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 71, n. 3, p. 462-470, 2012.

OLIVEIRA, A. S.; MALTA, H. L.; MARTINEZ, E. A. Caracterização de mel de mandaçaia (*Melipona mandacaia*) com vista à produção de hidromel. **In: Seminário de Iniciação Científica da UEFS – Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, 27.**, 2023, Feira de Santana. Anais [...]. Feira de Santana: UEFS, 2023.

SANTOS, J.; SOMERA, T. **Efeito das condições de infusão sobre o teor de compostos bioativos do chá de hibisco (*Hibiscus sabdariffa* L.)**. 2022. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, São Miguel do Oeste, 2022.

SANTOS, K. C. dos; SARTORI, G. V.; AQUINO, A. C. M. S. Avaliação do conhecimento e do interesse por hidromel: uma pesquisa de mercado com consumidores da região Sul do Brasil. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Guarujá: Editora Científica Digit, v. 5, p. 83-92, 2021.

SENN, K.; CANTU, A.; HEYMANN, H. Characterizing the chemical and sensory profiles of traditional American meads. **Journal of Food Science**, v. 86, n. 2, p. 1-13, fev. 2021.

SILVA, C. L. *et al.* Modelagem e estimação de parâmetros do processo de produção de etanol em reator batelada por *Saccharomyces cerevisiae*. **Scientia Plena**, v. 12, n. 5, p. 1-14, 2016.

SMITH, J. *et al.* Influence of water mineral profile on fermentation and turbidity in beverage production. **Journal of Food Engineering**, v. 200, p. 45-52, 2017.

STAROWICZ, M.; GRANVOGL, M. Effect of wort boiling on volatiles formation and sensory properties of mead. **Molecules**, v. 27, p. 710, 2022.

VIZZOTTO, M.; CASTILHO, P. M.; PEREIRA, M. C. Compostos bioativos e atividade antioxidante em cálices de (*Hibiscus sabdariffa* L.). **Embrapa Clima Temperado**, Comunicado Técnico, p. 1-7, 2009.

VIZZOTTO, M.; PEREIRA, M. C. **Hibisco: do uso ornamental ao medicinal**. 2008.

CAPÍTULO 4

A VINHAÇA E SEUS MÚLTIPLOS USOS: UMA REVISÃO DE POTENCIALIDADES E DESAFIOS

Guilherme Antônio Mariga¹, Alexander Junges²

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI) - *e-mail*: guimariga38@gmail.com

² Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química/Alimentos (URI) - *e-mail*: junges@uricer.edu.br

RESUMO: A vinhaça, resíduo líquido gerado na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, é produzida em grande volume e apresenta alto potencial poluidor devido à sua elevada carga orgânica, baixa acidez e composição complexa. Tradicionalmente considerada um passivo ambiental, hoje é valorizada por seu conteúdo de nutrientes, sendo amplamente utilizada na fertirrigação da cana, promovendo ganhos na fertilidade do solo e na produtividade agrícola. Sua composição varia conforme o tipo de mosto, processo de fermentação e destilação, contendo macro e micronutrientes, compostos orgânicos biodegradáveis e traços de metais. No entanto, o uso excessivo ou manejo inadequado pode gerar sérios impactos ambientais, como a contaminação de corpos d'água e proliferação de insetos. Diante disso, crescem os estudos voltados ao aproveitamento sustentável da vinhaça, como sua aplicação na compostagem, produção de bioinsumos, geração de biogás por digestão anaeróbia e produção de hidrogênio por fermentação. Essas alternativas demonstram viabilidade técnica e econômica, além de contribuir para a economia circular e a sustentabilidade da cadeia produtiva do etanol. Esta revisão apresenta um panorama atualizado sobre a composição, impactos e potencial de reaproveitamento da vinhaça, destacando desafios e oportunidades para seu manejo sustentável.

Palavras-chave: vinhaça; reaproveitamento de resíduos; fertirrigação; digestão anaeróbica; sustentabilidade.

Introdução

A vinhaça, também conhecida regionalmente como vinhoto ou restilo, é um resíduo líquido resultante da etapa de destilação durante a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Estima-se que, para cada litro de etanol produzido, sejam gerados de 10 a 15 litros de vinhaça (Fialho *et al.*, 2019), o que a torna um dos principais resíduos da cadeia produtiva sucroalcooleira. Trata-se de um efluente rico em matéria orgânica e inorgânica, além de conter nutrientes como o potássio, que justificam seu uso frequente na irrigação de lavouras, especialmente na fertirrigação da própria cana-de-açúcar.

De acordo com levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2024) para a safra 2024/25, a produção de cana-de-açúcar no Brasil está estimada em 689,8 milhões de toneladas. Esse volume representa, uma redução de 3,3% em comparação à safra anterior. Essa queda é atribuída principalmente às condições climáticas desfavoráveis na Região Centro-Sul, marcadas por baixa pluviosidade e temperaturas elevadas, que impactaram negativamente o desenvolvimento das lavouras. Por outro lado, a Região Nordeste apresentou melhores condições climáticas, contribuindo positivamente para a produtividade local.

Ainda segundo a Conab, a área colhida de cana-de-açúcar deve aumentar 3,5%, alcançando 8,63 milhões de hectares, o que representa um acréscimo de cerca de 290 mil hectares em relação à safra de 2023/24. Apesar disso, a produtividade média esperada é de 79.953 kg/ha, o que representa uma queda de 6,6% frente à temporada anterior, que havia registrado um recorde histórico. Estima-se que aproximadamente 50% da produção de cana continuará sendo direcionada à fabricação de açúcar. Já a produção de etanol está projetada em 28,5 bilhões de litros para essa nova safra.

A vinhaça, por muito tempo considerada um poluente perigoso, hoje é amplamente valorizada por seu potencial como fertilizante natural. Isso se deve ao seu elevado teor de matéria orgânica e à presença de minerais como potássio, cálcio e magnésio, que são benéficos ao solo. No entanto, o uso excessivo e sem controle pode acarretar sérios riscos ambientais, especialmente em regiões com solos arenosos e baixa capacidade de troca catiônica, pois favorecem a lixiviação de nutrientes, principalmente o potássio. Diante disso, sua aplicação agrícola é regulamentada por legislações ambientais que visam garantir a segurança do solo e dos corpos d'água próximos às áreas agrícolas.

Adicionalmente, devido ao grande volume gerado nas destilarias, o transporte da vinhaça para regiões mais distantes se torna economicamente inviável, o que limita seu uso agrícola às áreas próximas das usinas. Nesse contexto, a compostagem surge como uma alternativa mais sustentável e

eficiente, permitindo o aproveitamento dos nutrientes presentes no resíduo de forma mais segura e concentrada (Embrapa, 2018). A transformação da vinhaça em composto orgânico reduz significativamente os riscos de contaminação ambiental, além de facilitar o armazenamento e o transporte.

Caso a vinhaça seja descartada de forma inadequada, seus efeitos ambientais podem ser graves. Ao atingir corpos d'água como rios e lençóis freáticos, a vinhaça eleva a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), o que pode levar à desoxigenação da água e à morte de organismos aquáticos. Esse cenário representa uma ameaça à saúde de humanos, animais e plantas. Ambientalistas têm manifestado preocupação quanto à poluição causada pela aplicação descontrolada de vinhaça em plantações de cana-de-açúcar. Outro problema recorrente é o acúmulo do resíduo em áreas de armazenamento, que serve como atrativo para infestações de moscas. Essas moscas se alimentam da vinhaça e, ao se proliferarem em grande número, causam prejuízos aos criadores de gado, provocando anemia nos animais e redução na produção de leite (Fialho *et al.*, 2019).

A composição mineral da vinhaça é dominada pelo potássio, que é o elemento presente em maior concentração, seguido de cálcio, sulfatos, nitrogênio, fósforo e magnésio. No que se refere aos micronutrientes, destaca-se o ferro, em maiores teores, seguido pelo manganês, cobre e zinco em concentrações menores (Silveira, 2016). Esses elementos tornam a vinhaça uma fonte relevante de nutrientes para o solo, desde que sua aplicação seja feita com base em critérios técnicos e em conformidade com as normas ambientais vigentes.

Nos últimos anos, tem-se observado um crescente interesse por parte da comunidade científica e do setor produtivo em estudar formas alternativas e sustentáveis de reaproveitamento da vinhaça. Essa preocupação é motivada tanto pela busca por práticas mais responsáveis ambientalmente quanto pela necessidade de minimizar os impactos gerados pelo descarte incorreto desses resíduos. Conhecer a fundo a composição química da vinhaça e os efeitos de sua aplicação é essencial para viabilizar o uso seguro desse subproduto, seja como fertilizante, fonte energética ou insumo em processos industriais.

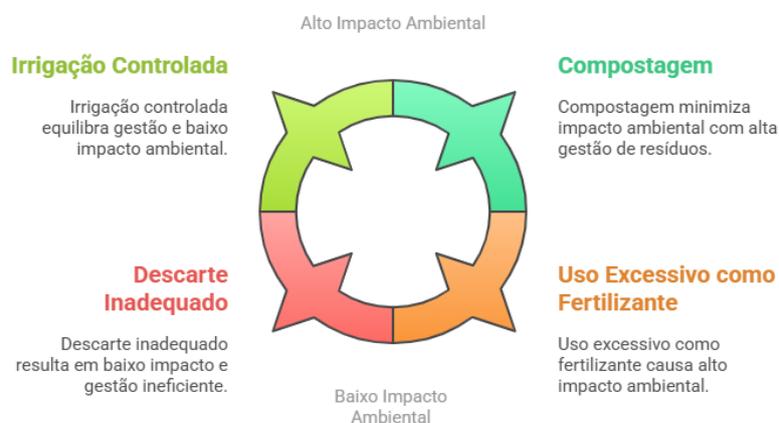
Além do uso direto na agricultura, estratégias inovadoras vêm sendo desenvolvidas para agregar valor à vinhaça. Um estudo conduzido por Dias *et al.* (2024), investigou o cenário científico e tecnológico relacionado à aplicação da vinhaça, por meio da análise de patentes e publicações científicas. A pesquisa utilizou revisão sistemática de bases de dados e ferramentas de análise bibliométrica como VOSViewer, CiteSpace e CitNetExplorer, além de mapear redes de citação e perfis de pesquisa. Os resultados mostraram que as principais

aplicações da vinhaça incluem: produção de biocombustíveis, recuperação de compostos orgânicos, fertilização, biorremediação e hidrólise enzimática.

O estudo de Dias *et al.* (2024) destaca ainda a crescente relevância da vinhaça como um subproduto valorizável dentro da cadeia produtiva do etanol. No entanto, ainda existem obstáculos a serem superados, especialmente no que diz respeito ao gerenciamento de resíduos e ao desenvolvimento de tecnologias que tornem seu uso mais eficiente e seguro. O manejo correto da vinhaça e sua destinação adequada são fundamentais para prevenir contaminações, preservar a qualidade do solo e dos recursos hídricos, além de promover um modelo de produção mais sustentável.

Em síntese, a vinhaça deixou de ser apenas um resíduo poluente e passou a ser reconhecida como um recurso estratégico. Desde que utilizada com responsabilidade, torna-se uma aliada na promoção da sustentabilidade da agroindústria canvieira, contribuindo para o fechamento de ciclos produtivos e para a valorização dos resíduos gerados na produção de etanol. A Figura 1 demonstra visualmente um resumo dos impactos ambientais descritos.

Figura 1 - Resumo visual dos impactos ambientais



Fonte: Elaborado em Napkin AI (2025).

Metodologia

A seleção dos materiais utilizados nesta pesquisa foi realizada por meio de consultas a diversas fontes acadêmicas e técnicas, incluindo as bases de dados ScienceDirect, SciELO, Google Acadêmico e ResearchGate, bem como trabalhos acadêmicos (TCCs, dissertações e teses), livros disponíveis na biblioteca virtual da URI-Erechim, além de normas e legislações nacionais e internacionais. Foram

considerados estudos publicados nos idiomas português e inglês, que tratassem de aspectos técnicos, operacionais e econômicos relacionados ao uso da vinhaça proveniente da cana-de-açúcar. As buscas foram conduzidas com o uso de termos como: *vinhaça, cana-de-açúcar, resíduo agroindustrial, subproduto da destilação, fertirrigação com vinhaça, tratamento de efluentes da agroindústria sucroalcooleira*, entre outras palavras-chave correlatas.

Composição da vinhaça

A composição da vinhaça pode variar significativamente a depender do solo, condições climáticas, cultivar de cana-de-açúcar, tratamento utilizado, entre outros fatores. Abaixo, a Tabela 1 descreve a caracterização da vinhaça tanto in natura, quanto concentrada.

Tabela 1. Caracterização da vinhaça “in natura” e concentrada

Composto	Vinhaça in natura		Vinhaça concentrada	
pH	3,93	4,02	3,99	3,97
Nitrato NO3-N (mg/L)	134,00	125,00	415,00	330,00
Nitrogênio Amoniacal (mg/L) NH4	38,00	45,00	4,00	7,00
Nitrogênio Total (mg/L)	210,00	644,00	994,00	1335,60
Cálcio (mg/L)	675,00	1350,00	1600,00	1450,00
Fosfato (mg/L)	427,10	561,54	408,05	532,56
Sulfato (mg/L)	1300,00	1650,00	5700,00	400,00
Potássio (Kg/m3) K2O	2,79	2,98	6,90	6,70
Magnésio (mg/L) Mg	250,00	300,00	1150,00	1150,00
Sódio (mg/L) Na	375,00	400,00	250,00	275,00

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2019).

A composição da vinhaça varia conforme o solo, clima, tipo de mosto (caldo, melaço ou mistura), cultivar de cana, método de fermentação, levedura e técnica de destilação. É um líquido escuro, com cerca de 93% de água e 7% de sólidos (75% orgânicos e 25% minerais). A coloração é atribuída à presença de melanoidinas, fenóis e produtos da degradação térmica de açúcares e compostos nitrogenados.

Entre os compostos orgânicos destacam-se glicerol, ácidos (lático, acético, cítrico), açúcares (glicose, frutose, sacarose) e álcoois. Os principais nutrientes inorgânicos são potássio, cálcio, magnésio, enxofre, nitrogênio e fósforo. O alto teor de matéria orgânica confere à vinhaça uma DBO média de 16.000 mg·L⁻¹, valor superior ao de muitos efluentes industriais, indicando elevado potencial poluidor.

A vinhaça apresenta pH ácido (aproximadamente 4,3), alta temperatura na origem, elevada corrosividade e pode conter traços de metais pesados. Portanto, seu uso como fertilizante deve ser controlado, e o tratamento adequado é essencial para evitar impactos ambientais e viabilizar seu reaproveitamento sustentável (Lima *et al.*, 2016).

Impactos da vinhaça

As usinas vêm utilizando a vinhaça na agricultura, principalmente por meio da fertirrigação. No estudo de Silva, Bono e Pereira (2014), o objetivo foi avaliar os efeitos da aplicação de diferentes doses de vinhaça sobre atributos químicos do solo e sobre a produtividade dos colmos de cana-de-açúcar ao longo de três anos. O experimento foi conduzido em um Neossolo Quartzarênico Órtico, localizado em Campo Grande (MS), entre novembro de 2008 e setembro de 2011. As parcelas experimentais (4,2 × 10,0 m) receberam doses de vinhaça de 0, 100, 200, 400 e 800 m³·ha⁻¹, organizadas em delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. A vinhaça, oriunda de uma usina local, foi aplicada durante a rebrota da cana nas três safras consecutivas. Os resultados mostraram que a vinhaça contribuiu para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, além de elevar o pH e os teores de potássio trocável no solo até a profundidade de 0,4 m.

Em Tavares *et al.* (2015), investigou-se o impacto da aplicação de vinhaça associada à colheita mecanizada nos atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de cana. A fertirrigação com vinhaça não alterou significativamente a densidade do solo, densidade de partículas ou porosidade total. No entanto, a colheita mecanizada promoveu aumento da compactação e da porosidade, indicando alterações na estrutura física. A vinhaça aumentou a disponibilidade de nutrientes no solo, enquanto nas áreas sem aplicação observou-se pH mais ácido e alta saturação por alumínio, o que

comprometeu a disponibilidade de nutrientes. O estudo conclui que a vinhaça contribui para a melhoria da fertilidade do solo a longo prazo em sistemas canavieiros.

Outro experimento, realizado na Fazenda Areão, em Piracicaba (SP), entre dezembro de 2012 e novembro de 2013, avaliou os efeitos da aplicação de vinhaça tanto in natura quanto concentrada, associada ou não a fertilizantes nitrogenados sobre a variedade de cana-de-açúcar SP82-3250. O solo utilizado foi um Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico. Foram definidos cinco tratamentos em delineamento em blocos ao acaso com seis repetições. A vinhaça, proveniente da Usina Costa Pinto (Grupo Cosan/Raízen), apresentava 22% de sólidos e foi aplicada com rigor técnico quanto à vazão e à caracterização química. Os resultados indicaram que tanto a vinhaça isolada quanto a combinada com fertilizante nitrogenado aumentaram significativamente a produtividade da cana sem comprometer sua qualidade tecnológica.

Além disso, a aplicação de vinhaça promoveu maior disponibilidade de potássio (K^+) e magnésio (Mg^{2+}), além de ligeiro aumento do pH do solo, favorecendo as condições de fertilidade. Aplicações com vinhaça in natura e concentrada, quando utilizadas em doses similares de potássio, apresentaram efeitos equivalentes. A associação com adubação nitrogenada potencializou a produtividade, possivelmente devido ao aumento combinado de fertilidade e disponibilidade de nitrogênio na forma de nitrato e amônio. Nas análises foliares, observou-se elevação do teor de potássio no caldo da cana, o que, embora esperado, pode impactar negativamente a produção de açúcar, favorecendo a formação de melaço e diminuindo o rendimento industrial (Silva *et al.*, 2019).

A longo prazo, a adição de matéria orgânica ao solo canavieiro, seja pela manutenção da palhada (cana crua) ou pelo uso de vinhaça, promove melhorias expressivas na qualidade química do solo. Segundo Bebé *et al.* (2009), observou-se aumento nos teores de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} e fósforo disponível, além da elevação da capacidade de troca catiônica (CTC), especialmente em áreas com maior adição de carbono. Houve também acréscimo no carbono total e nitrogênio do solo, com mudanças na composição da matéria orgânica, destacando-se a formação de ácidos húmicos mais condensados e estáveis. Tais transformações contribuem para maior retenção de nutrientes, redução de perdas por lixiviação e sustentação de sistemas conservacionistas, como a cana crua e a aplicação controlada de vinhaça, em detrimento do manejo convencional com queima.

A vinhaça, subproduto líquido da produção de etanol, é rica em compostos orgânicos e minerais, cuja composição depende do tipo de mosto e do processo industrial. Estudos indicam que seu uso como biofertilizante via fertirrigação eleva a produtividade, melhora a fertilidade do solo e reduz a necessidade de

fertilizantes minerais. Contudo, o uso inadequado pode levar a problemas como lixiviação de nutrientes e compactação do solo. Para superar essas limitações, tem-se adotado a vinhaça concentrada e enriquecida, obtida por evaporação e adição de nutrientes. Essa tecnologia aumenta o valor agrônômico da vinhaça, reduz o volume a ser aplicado e melhora a logística e custos operacionais. Segundo Silva *et al.* (2023), essa inovação tem se mostrado promissora para uma agricultura mais eficiente e sustentável, alinhando produtividade com responsabilidade ambiental no setor sucroenergético.

Biodigestão

A implementação de tecnologias como a biodigestão anaeróbia e a concentração da vinhaça representa uma oportunidade estratégica de inovação para as usinas e também para órgãos públicos. Essas soluções permitem transformar resíduos industriais e agroindustriais em produtos de alto valor agregado. Embora a fertirrigação seja a aplicação mais comum da vinhaça, a busca por alternativas mais eficientes e sustentáveis tem se intensificado diante dos desafios associados ao seu manejo. O elevado volume gerado e os altos custos logísticos de transporte, somados ao risco de poluição do solo e da água, continuam sendo obstáculos relevantes para o uso seguro e eficiente da vinhaça.

Entre as soluções emergentes, destaca-se a digestão anaeróbia da vinhaça para a produção de biogás, que pode ser utilizado para gerar energia elétrica ou térmica dentro das próprias usinas. Além disso, a água residual resultante do processo pode ser reutilizada em diversas etapas operacionais, como lavagem da cana, limpeza de equipamentos e alimentação de caldeiras, promovendo maior eficiência hídrica e energética (Silva *et al.*, 2019).

A geração de eletricidade a partir da vinhaça, via biodigestão, é considerada uma alternativa ambientalmente promissora. No entanto, sua implementação ainda esbarra em desafios técnicos e econômicos. Para que essa tecnologia funcione de forma contínua e eficiente, as usinas precisam realizar adaptações estruturais que garantam o fornecimento constante de vinhaça em volume e composição adequados. A técnica permite, contudo, que a produção de biogás ocorra paralelamente à fertirrigação, sem inviabilizar essa prática tradicional (Embrapa, 2015).

Atualmente, estima-se que o Brasil explore apenas 2% de seu potencial de geração de biogás. Segundo a Abiogás (2022), o país teria capacidade para produzir cerca de 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano volume suficiente para suprir aproximadamente 40% da demanda energética nacional e 70% do consumo de diesel. O biogás e o biometano, este último obtido pela purificação do primeiro, são fontes renováveis que podem ser geradas a partir de resíduos

agrícolas e agroindustriais. De acordo com Caneppele (2023), o Brasil conta com cerca de 675 instalações de biogás, mas apenas uma fração do potencial produtivo está em uso. A ampliação do uso dessas tecnologias representa uma oportunidade concreta de autossuficiência energética, sobretudo para pequenos e médios produtores rurais, contribuindo para a redução da dependência das distribuidoras e oscilações de preço dos combustíveis fósseis (Caneppele, 2023; Larsen *et al.*, 2024).

No estudo de Menezes *et al.* (2024), avaliou-se a viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia de uma mistura de vinhaça de cana-de-açúcar e glicerol, este último proveniente da indústria de biodiesel. Foram testados dois sistemas: um de estágio único e outro de dois estágios (termofílico + termofílico), ambos operando com taxas de carga orgânica de 5 a 20 kg DQO/m³ ao dia, em reatores de leito fluidizado anaeróbio. Os resultados apontaram que o sistema de estágio único apresentou desempenho superior, com até 33% mais rendimento energético, menor custo de investimento (US\$ 45 milhões), maior valor presente líquido (US\$ 58 milhões) e maior taxa interna de retorno (18%) em comparação ao sistema de dois estágios. Isso demonstra que o modelo de estágio único é não apenas mais eficiente em escala laboratorial, mas também mais viável para implantação industrial por sua simplicidade e menor custo operacional.

Em Telles, Filho e Amorim (2018), o foco foi a produção de hidrogênio a partir da vinhaça por meio de fermentação natural, utilizando diferentes concentrações do resíduo (10, 20, 35 e 43 g DQO·L⁻¹), identificadas como R1, R2, R3 e R4. Os testes foram conduzidos em reatores anaeróbios operando em batelada. Observou-se que, embora a produção total de H₂ aumentasse com o acréscimo da concentração, o rendimento específico diminuiu, passando de 1,31 para 0,77 mmol H₂·mmol⁻¹ de carboidrato. Esse efeito foi acompanhado por uma redução na eficiência de consumo de carboidratos (de 75% para 65%) e na remoção de matéria orgânica (DQO), que caiu de 33% para 22%. O reator R1, com menor concentração, obteve os melhores resultados em termos de produção de hidrogênio, eficiência de DQO e conversão de carboidratos. Isso indica que concentrações mais elevadas de substrato podem causar inibição do processo fermentativo.

A viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir da vinhaça por biodigestão depende de fatores como escala de produção, custo da tecnologia e preço de venda da energia. Segundo Araujo e Oliveira (2020), para uma usina com capacidade de 3.000 m³/dia, a viabilidade econômica ocorre a partir de US\$ 59,98/MWh com isenção fiscal. Já para pequenas usinas (100 m³/dia), esse custo sobe para US\$ 95,45/MWh, evidenciando o papel fundamental da economia de escala na atratividade do projeto. Apesar do alto

potencial energético da vinhaça, os valores ofertados nos leilões do Ambiente de Contratação Regulada (ACR) ainda não são competitivos para esse tipo de termelétrica, a menos que haja incentivos específicos, como políticas públicas de estímulo à biomassa e isenções fiscais.

Assim, a valorização energética da vinhaça depende tanto de avanços tecnológicos quanto da criação de mecanismos regulatórios que garantam retorno financeiro aos empreendimentos. A retomada de leilões exclusivos para biomassa, incentivos à geração distribuída e políticas voltadas à descarbonização do setor elétrico são fundamentais para que a vinhaça deixe de ser apenas um passivo ambiental e se consolide como um recurso estratégico na matriz energética nacional (Araujo; Oliveira, 2020).

Outras aplicações

A vinhaça in natura apresenta características físico-químicas desafiadoras para o meio ambiente, como acidez elevada (pH 4,7), alta carga orgânica (COT de 20.600 mg·L⁻¹) e intensa coloração (32.900 mg PtCo·L⁻¹), atribuída à presença de compostos fenólicos. Visando minimizar esses impactos, estudos têm avaliado o tratamento por adsorção utilizando bagaço de cana carbonizado e ativado quimicamente, como no trabalho de Seixas, Gimenes e Fernandes-Machado (2016). Os resultados indicaram que o carvão obtido a 800 °C apresentou alta eficiência na remoção de turbidez (até 83%) e, em processo de dois estágios com carvão a 600 °C, foram alcançadas remoções de 76% na cor, 85% na turbidez e 69% na DQO.

A eficiência do processo dependeu não apenas da área superficial dos adsorventes, mas principalmente de suas características químicas de superfície, polarizabilidade e ponto de carga zero (PCZ), os quais influenciam diretamente as interações eletrostáticas com os compostos presentes na vinhaça. O estudo também destaca o potencial energético do resíduo sólido pós-adsorção, que pode ser aproveitado como combustível nas caldeiras das usinas, contribuindo para a sustentabilidade do processo.

Conclusão

A vinhaça, resíduo abundante da produção de etanol, tem deixado de ser vista apenas como um passivo ambiental e vem ganhando destaque como um insumo estratégico na agricultura e na geração de energia. Sua composição, rica em matéria orgânica, potássio e outros nutrientes, justifica seu uso como biofertilizante, especialmente via fertirrigação em lavouras de cana-de-açúcar. Estudos demonstram que, quando bem manejada, a vinhaça contribui positivamente para a fertilidade do solo, elevando a produtividade agrícola e

promovendo melhorias nos atributos químicos e físicos do solo. No entanto, seu elevado potencial poluidor relacionado à alta carga orgânica, acidez e presença de compostos de difícil degradação, exige controle rigoroso quanto à aplicação e à disposição. A diversificação dos métodos de aproveitamento da vinhaça, como a compostagem, a produção de bioinsumos e a valorização de seus compostos, reforça seu papel na sustentabilidade da cadeia sucroenergética. Adicionalmente, a adoção de tecnologias como a digestão anaeróbia para produção de biogás ou hidrogênio tem se mostrado promissora, agregando valor energético ao resíduo e contribuindo para a transição rumo a fontes renováveis. Pesquisas indicam que a vinhaça pode ser utilizada isoladamente ou em codigestão com outros resíduos, como o glicerol, apresentando desempenho técnico e econômico viável em escala industrial. Apesar dos entraves operacionais e logísticos ainda existentes, o avanço tecnológico tem permitido maior eficiência nos sistemas de biodigestão, além de incentivar a descentralização energética em regiões produtoras. Assim, a vinhaça, quando tratada e reaproveitada de forma adequada, pode deixar de ser um problema ambiental e se tornar uma solução multifuncional para os setores agrícola, energético e industrial.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS. **Novo potencial do biogás para o mercado brasileiro durante o fórum em São Paulo**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>. Acesso em: 25 jun. 2025.

ARAUJO, G. J. F. D.; OLIVEIRA, S. V. W. B. D. Analysis of financial and economic feasibility of the use of vinasse for electricity generation in Brazil. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 18, n. 4, p. 936-955, 2020. DOI: 10.1590/1679-395120190069. Acesso em: 15 jun. 2025.

BEBÉ, F. V. *et al.* Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 781-787, nov. 2009. DOI: 10.1590/S1415-43662009000600017. Acesso em: 15 jun. 2025.

CANEPPELE, F. L. Brasil utiliza apenas 2% do seu potencial em biocombustíveis. **Jornal da USP**, São Paulo, 08 ago. 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/brasil-utiliza-apenas-2-do-seu-potencial-em-biocombustiveis/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 12, n. 2, 2024.

DIAS, A. S. *et al.* Advancements in vinasse application: An integrated analysis of patents, literature and research profile. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 22, p. 100795, 2024. DOI: 10.1016/j.clet.2024.100795. Acesso em: 05 mar. 2025.

EMBRAPA. **Complementaridade da matriz energética brasileira: o potencial da cana-de-açúcar e seus coprodutos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/publicacao/1036036/complementaridade-da-matriz-energetica-brasileira-o-potencial-da-cana-de-acucar-e-seus-co-produtos>. Acesso em: 05 mar. 2025.

EMBRAPA. **Efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades do solo e produtividade da cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/fluxodebits/item/196706/1/COT-218>. Acesso em: 25 jun. 2025.

FIALHO, M. L. *et al.* Impacto da vinhaça produzida pela cana-de-açúcar na produção de etanol – poluição ambiental. **Intr@ciência revista científica**, v. 17, março 2019. Disponível em: https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20190312105011.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.

LARSEN, L. *et al.* Potencial da vinhaça como biofertilizante e fonte de geração de energia renovável do tipo biogás. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 6, p. e5126, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n6-067. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5126>. Acesso em: 24 maio 2025.

LIMA, F. A. *et al.* Revisão sobre a toxicidade e impactos ambientais relacionados à vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira. **Cadernos UniFOA**, v. 11, n. 32, p. 27-34, 2016. DOI: 10.47385/cadunifoa.v11.n32.465. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/465>. Acesso em: 24 maio 2025.

MENEZES, C. *et al.* A techno-economic assessment of hydrogen and methane production from the anaerobic treatment of vinasse and glycerol: Single-vs.

two-stage process. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 187, 2024. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.005. Acesso em: 12 Abr. 2025.

NAPKIN AI. **Napkin AI - The visual AI for business storytelling**. Disponível em: <https://www.napkin.ai>.

SCHULTZ, N. *et al.* Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 811–820, maio 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000300023. Acesso em: 08 maio 2025.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 39, n. 2, p. 172-179, 2016.

SILVA, A. P. M. DA; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 38-43, 2014.

SILVA, G. S. P. L. *et al.* Efeitos da aplicação de vinhaça “in natura” ou concentrada, associado ao n-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. **Holos Environment**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 1-21, 2019. DOI: 10.14295/holos.v19i1.12212. Disponível em: <https://www.ceanesp.org.br/holos/article/view/12212>. Acesso em: 02 mar. 2025.

SILVA, J. H. B. *et al.* Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: Uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 2, 2023. DOI: 10.36560/16220231651. Disponível em: <https://scientificelectronarchives.org/index.php/SEA/article/view/1651>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SILVA, M. *et al.* Aproveitamento da vinhaça residual da produção do etanol para geração de biogás: uma revisão. **Retec**, v. 12, n. 2, p. 17-25, jul./dez. 2019.

SILVEIRA, R. N. C. M. **Conservação, uso racional e sustentável da água: Manejo e cuidados no uso da vinhaça na Fertirrigação (4h)**. Agência nacional das águas, 2016. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/images/curso_manejo_e_cuidados_no_uso_da_vinhaça_fertirri_gacao/Manejo_de_vinhaca.pdf. Acesso em: 02 mar. 2025.

TAVARES, V. N. *et al.* Influência da Vinhaça e Colheita Mecanizada nos Aspectos Físicos e Químicos do Solo no Município de Paudalho - PE. **Sociedade & Natureza**, v. 36, p. e69886, 2024.

CAPÍTULO 5

MICROPLÁSTICOS EM FOCO: RECICLAGEM QUÍMICA DE POLÍMEROS COM LÍQUIDOS IÔNICOS COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL

Fabiana de Oliveira Pereira¹, Adriele Sabrina Todero², Paloma Truccolo Reato³,
Marcelo Luis Mignoni⁴

¹Acadêmica do Curso de Engenharia Química (URI) - fabiana.opereira10@gmail.com

²Mestranda em Engenharia de Alimentos (URI) - adrieletodero@gmail.com

³Doutoranda em Engenharia de Alimentos (URI) - palomareato@gmail.com

⁴Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química (URI) - mignoni@uricer.edu.br

RESUMO: Este artigo revisa a problemática dos microplásticos e o uso de líquidos iônicos como catalisadores na despolimerização de plásticos. O objetivo é discutir a geração de resíduos plásticos, a presença de microplásticos em ecossistemas e água potável e estratégias de reciclagem química. A metodologia envolve uma pesquisa bibliográfica em bases como Scopus e PubMed, dos anos de 1999 a 2025. Os resultados mostram que microplásticos, fragmentos menores que 5 mm, poluem ambientes aquáticos e terrestres, afetando biodiversidade e saúde humana ao adsorverem poluentes tóxicos e em sua própria degradação. A reciclagem química destaca-se por quebrar polímeros como PET em monômeros reutilizáveis, com alta eficiência e seletividade em condições brandas. A utilização de líquidos iônicos como catalisadores dessas reações é uma alternativa viável e apresenta bons resultados, visando eficiência e aproveitamento do processo. Conclui-se que líquidos iônicos oferecem uma solução sustentável para gestão de resíduos plásticos, já que esses podem ser reutilizados na forma de seus monômeros, reduzindo impactos ambientais.

Palavras-chave: microplásticos; despolimerização; líquidos iônicos; reciclagem química.

Introdução

O descarte inadequado de plásticos gera uma série de problemas ambientais significativos, sendo a fragmentação de polímeros um dos mais alarmantes. Quando plásticos são descartados de forma incorreta, eles se decompõem lentamente, levando à formação de microplásticos (MPs), partículas com menos de 5 milímetros que se acumulam em ambientes aquáticos e terrestres. Essa fragmentação não apenas polui os ecossistemas, mas também afeta a fauna, que pode confundir esses fragmentos com alimento, entrando na cadeia alimentar e trazendo riscos à saúde de animais e humanos.

No contexto da sustentabilidade, esse e outros problemas mundiais foram pautas para o desenvolvimento dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) e da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Os ODS, como são comumente chamados, foram criados em 2015, na Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015) e incluem 17 objetivos que devem ser atingidos até 2030. Dentre eles, os ODS 3, 6, 12 e 14, que correspondem a “Saúde e Bem Estar”, “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos”, “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis” e “Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável”, respectivamente, englobam os objetivos deste trabalho.

Os métodos de despolimerização e biodegradação, como o uso de líquidos iônicos para a quebra de PET e a conversão de poliestireno em monômeros recicláveis, visam reduzir a presença desses materiais no ambiente e minimizar seus efeitos adversos à saúde humana e à biodiversidade

Os Líquidos Iônicos (LIs) são compostos formados por um íon positivo (cátion) e um íon negativo (ânion), cuja estrutura molecular impede que se organizem em um cristal sólido, tornando-os líquidos em temperatura ambiente. Caracterizam-se por sua baixíssima pressão de vapor, alta estabilidade térmica e elevada solubilidade em outros líquidos iônicos e certos compostos orgânicos, o que os torna versáteis em diversas áreas químicas e da engenharia (Consorti *et al.*, 2001). Esses têm demonstrado grande potencial no processo de despolimerização de plásticos, contribuindo para a quebra de cadeias poliméricas em moléculas menores de forma eficiente e seletiva. Essa aplicação é especialmente relevante no contexto das ODS citadas anteriormente.

Dentro dessa perspectiva, o trabalho faz uma abordagem bibliográfica sobre os principais polímeros utilizados, bem como a geração de microplásticos e a implicação com a água do planeta e a saúde pública. Ainda, aborda de forma geral o uso de líquidos iônicos para a despolimerização desses plásticos.

Metodologia

Esta revisão foi realizada com o objetivo de reunir e discutir a literatura científica referente à geração de resíduos sólidos, a presença de microplásticos no ambiente e na água potável, bem como as estratégias de despolimerização utilizando líquidos iônicos.

A pesquisa bibliográfica foi conduzida entre os anos de 1999 e 2025, utilizando as bases de dados Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, Google Scholar e ACS Publications. Os descritores utilizados incluíram os termos: "*microplastics*", "*despolymerization*", "*ionic liquids*", "PET", "*polystyrene*", entre outros, combinados de acordo com a estratégia de busca adotada em cada base.

Foram considerados para análise artigos científicos, dissertações, teses e capítulos de livros, em português e inglês, que abordassem de forma direta os temas propostos. A seleção inicial se deu pela leitura dos títulos e resumos. Os trabalhos selecionados foram lidos integralmente e analisados criticamente, sendo os dados extraídos organizados de forma temática, visando estruturar a discussão e permitir uma síntese coerente do estado atual do conhecimento científico sobre o assunto.

A geração de resíduos sólidos

A crescente geração de resíduos sólidos ameaça os oceanos, a vida marinha e a sustentabilidade global. Em 2023, o mundo produziu 2,1 bilhões de toneladas de resíduos sólidos municipais, com projeções de aumento para 3,8 bilhões até 2050, intensificando a poluição de ecossistemas e emissões de gases como metano (Programa Das Nações Unidas Para O Meio Ambiente; International Solid Waste Association, 2024). Esse cenário, agravado pela má gestão que gerou custos ocultos de US\$361 bilhões em 2020, compromete o futuro do planeta. Diante disso, o consumo consciente ganha força como estratégia essencial para reduzir a geração de resíduos e promover um modelo sustentável.

O Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil, emitido pela Abrelpe, no ano de 2022, cita que cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos foram geradas em áreas urbanas do país, uma média de 381 kg por pessoa anualmente. Isso equivale a 85,8 milhões de carros populares empilhados (ABRELPE, 2022).

Entre os resíduos apresentados conforme a composição do material seco recuperado, tem-se papel e papelão, correspondendo a 39%, o plástico, com 24%, os metais, 12%; o vidro, correspondendo a 11%; e outros tipo de lixo, como pilhas, baterias e lixo hospitalar, que são 14% (SINIR, 2019).

De todos esses citados, o plástico é o que tem maior processamento pela cadeia de reciclagem, cerca de 17%, além de representar 38% do valor

comercializado pelos catadores (ANCAT, 2023).

Polímeros

Moléculas grandes, isto é, com um número alto de átomos interligados (monômeros), são consideradas macromoléculas. Essas geram propriedades particulares, como resistência, viscosidade e solubilidade, podendo depender de suas interações intra e intermoleculares e, também, da forma e comprimento de suas ramificações (Mano, 1999). Essas macromoléculas são facilmente reconhecidas pela sua capacidade de formar películas/filmes chamados: polímeros.

A estrutura da molécula diz muito sobre suas propriedades e as diferencia dos demais tipos de polímeros. Por exemplo, a diferença estrutural entre o polietileno de baixa densidade (PEBD) - cadeia ramificada aleatória - e o de alta densidade (PEAD) - cadeia linear - faz com que a temperatura de fusão, porcentagem de cristalinidade, resistência à tração e alongação da ruptura de um seja diversas vezes maior do que a de outro (Canevarolo, 2002). Assim, quando é necessário escolher por um desses, o PEAD é muito mais resistente em vários aspectos.

O Brasil ocupa o quarto lugar no ranking mundial de maior produtor de plástico, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia (ANCAT, 2023). Em 2021, os índices de plástico reciclado (pós-consumo) foram: PET (Politereftalato de etileno): 56,4%; PEAD (Polietileno de alta densidade): 29%; PP (Polipropileno): 20,3%; PEBD (Polietileno de baixa densidade): 10,6%; PS (Poliestireno): 9,4% e PVC (Policloreto de vinila): 3% (ABIPLAST, 2022).

Porém, essa porcentagem de plástico reciclado é muito pequena em relação ao seu consumo total e isso impacta diretamente no meio ambiente e na vida marinha. Nos oceanos, esse material descartado incorretamente gera o que se chama de "ilhas de plástico", que são carregadas pelas correntes marítimas e flutuam pelos mares, resultando em perdas gigantescas para o ecossistema (Montagner *et al.*, 2021).

Os principais polímeros utilizados industrialmente, juntamente com as principais aplicações, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais polímeros, percentual de consumo e principais aplicações

Polímero	Consumo (%)	Aplicações	Identificação
Poli(tereftalato de etileno)	6,9	Embalagens e fibras têxteis	
Polietileno de alta densidade	14,6	Embalagens e recipientes	
Policloreto de Vinila	13,0	Embalagens e tubulações	
Polietileno de baixa densidade	9,5	Embalagens, sacolas e brinquedos	
Polipropileno	19,4	Embalagens, tubulações e recipientes	
Poliestireno	5,0	Embalagens e eletrodomésticos	
Outros (PEBDL, EPS, EVA, plásticos reciclados, plásticos de engenharia)	31,6	Embalagens, isolantes e calçados	

Fonte: Olivatto, (2018).

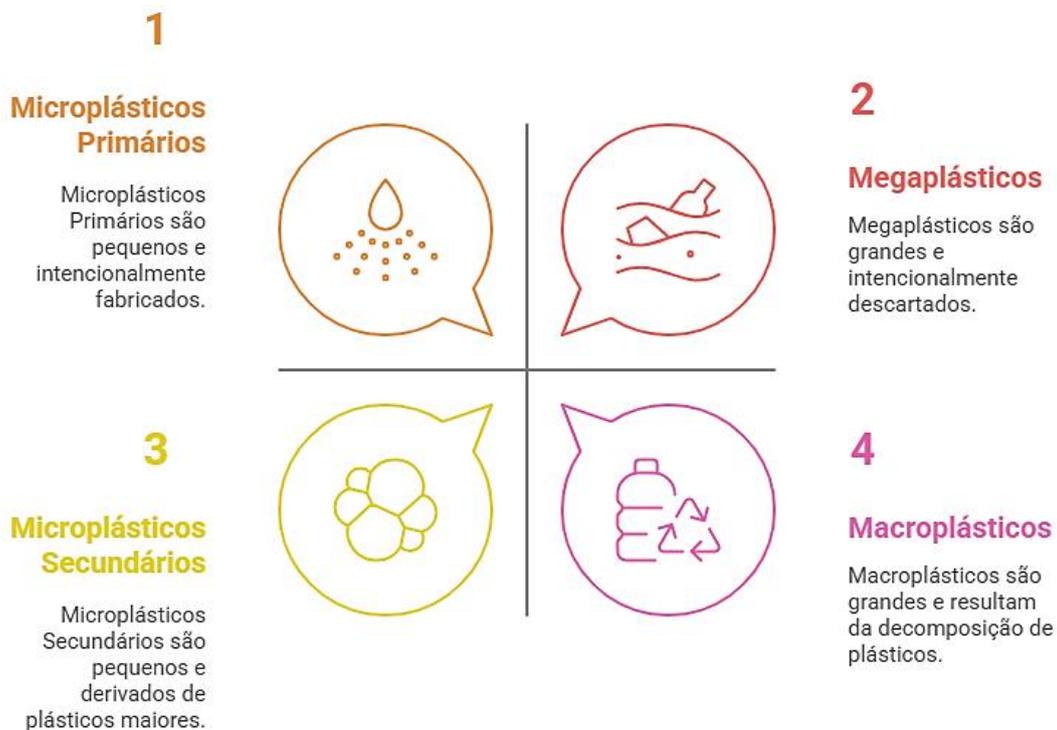
Um estudo recente realizado pelo Instituto Federal do Paraná investigou a presença de resíduos plásticos no trato digestório de tainhas (*Mugil liza*) e mostrou a gravidade do problema. A pesquisa foi realizada numa área considerada de proteção ambiental, no litoral sul do estado de São Paulo, onde acontece a pesca não predatória. Dos 57 indivíduos analisados, 70,18% possuíam algum tipo de resíduo plástico, sendo a microfibras de nylon a mais comum (95,56% do total). Essa é normalmente utilizada em produtos de pesca e agregados (De Fatima Filla; Moreira; Bussolaro, 2024). Visto que essa espécie de

peixe é muito comum na alimentação humana, a presença de microplásticos em seus organismos representa uma séria ameaça à saúde pública. Outro estudo mostrou a detecção de poluentes orgânicos no mar profundo, considerado o último limite para os impactos humanos no oceano. Silva e Sumida (2023) mostraram que a ingestão de microplásticos por organismos bentônicos varia conforme o modo alimentar, com filtradores e detritívoros sendo mais suscetíveis devido à acumulação de MPs em sedimentos, o que pode comprometer as relações simbióticas e a saúde do ecossistema profundo.

Microplásticos

Existe uma classificação para os plásticos encontrados em oceanos com base nos tamanhos de partícula, sendo: megaplásticos - partículas maiores que 1m; macropelásticos - partículas de até 1m; mesoplásticos - partículas de até 2,5cm e microplásticos - partículas de até 5 mm (Carpi-souza; Rocha; Tavares, 2025). Os microplásticos podem ser separados em duas classificações, primários e secundários, dependendo da sua origem. Os microplásticos primários são aqueles que foram feitos com a intenção de serem utilizados com essa granulometria e são descartados na natureza nesse tamanho (microesferas). Já os considerados secundários são aqueles que derivam da decomposição de plásticos maiores que foram se fragmentando e formando os microplásticos. Nessa decomposição, também são liberados aditivos químicos (corantes, plastificantes, estabilizantes...) utilizados para a formulação do plástico inicial, gerando uma complicação ambiental.

A Figura 1 apresenta, de forma esquematizada, a classificação e a origem de plásticos nos oceanos.

Figura 1 - Classificação e origem dos plásticos oceânicos

Fonte: Autoria própria (2025).

As empresas petroquímicas que produzem polímeros virgens (matéria-prima dos plásticos) são apontadas como as principais responsáveis pela base da cadeia de produção de plásticos descartáveis que se fragmentam em microplásticos. O relatório Plastic Waste Makers Index (2021), da Fundação Minderoo, identificou as 20 maiores empresas responsáveis por 55% dos resíduos plásticos de uso único globais, que contribuem significativamente para os microplásticos secundários. Estão em destaque entre elas: Exxon Mobil (EUA), Dow (EUA), Sinopec (China) e Braskem (Brasil).

Ficando logo atrás no ranking de produção de plásticos descartáveis, têm-se as indústrias de embalagens e bens de consumo, sendo as maiores consumidoras de plásticos virgens, convertendo o plástico produzido globalmente em produtos descartáveis, como embalagens de alimentos e bebidas. Um estudo realizado em 84 países e em conjunto com 12 universidades, procurou a origem dos resíduos de plásticos descartados. 50% das embalagens provinham de 56 empresas diferentes, estando em destaque: The Coca-Cola Company (11%), PepsiCo (5%), Nestlé (3%), Danone (3%) e Altria/Philip Morris (2%) (Cowger; Willis; Bullock, *et al.*, 2024). Essas embalagens, quando descartadas incorretamente, são uma fonte primária de microplásticos secundários.

Os microplásticos têm uma capacidade grande de absorção de produtos tóxicos, como pesticidas, metais pesados e POPs (poluentes orgânicos persistentes), gerando, mais uma vez, um transtorno na cadeia alimentar, já que esses poluentes, quando em contato com o organismo, podem resultar em disfunções hormonais, imunológicas, neurológicas e reprodutivas, causando assim uma intoxicação por POPs (UNIVASF, 2019).

Pesticidas, incluindo organoclorados como o DDT, são fortemente adsorvidos por microplásticos devido à sua natureza hidrofóbica, potencializando a contaminação ambiental (Xia; Niu; Yu, 2023). Um estudo conduzido pela Universidade de Osnabrück (Alemanha), ainda em 2010, demonstrou que MPs em ambientes aquáticos absorvem DDT e outros poluentes orgânicos persistentes (POPs), transferindo-os pela cadeia alimentar, desde zooplâncton até peixes consumidos por humanos (Zarfl; Matthies, 2010), com riscos associados a disfunções endócrinas, neurológicas e reprodutivas (Barboza *et al.*, 2020). Outro estudo, realizado na Universidade de São Paulo (USP) em 2023, investigou a interação de MPs com pesticidas como 2,4-D e fipronil, observando que a coexposição aumenta a toxicidade crônica em organismos aquáticos, como *Daphnia magna*, embora sem efeitos agudos imediatos (Mathi, 2018).

Metais pesados, como mercúrio, cádmio e cromo, também são adsorvidos por MPs, especialmente em ambientes aquáticos (Liu *et al.*, 2022). A pesquisa da Universidade Politécnica de Hong Kong (2023) mostrou que MPs interagem com cromo, alterando seu estado de oxidação e aumentando sua toxicidade em presença de filtros UV (Wai-Kit *et al.*, 2023). Além disso, uma análise foi feita com MPs de poliestireno envelhecidos (degradados), e apresentaram maior capacidade de adsorção de metais devido ao aumento de rugosidade e grupos funcionais em sua superfície (Mao *et al.*, 2020).

Os POPs, como bifenilas policloradas (PCBs), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), pesticidas organoclorados (ex.: DDT, DDE) e nonilfenol, apresentam alta afinidade com a superfície hidrofóbica dos MPs. Estudos indicam que a concentração de POPs em MPs pode ser até 10^6 vezes maior do que na água do mar circundante, devido à sorção química (Mato *et al.*, 2001). O projeto International Pellet Watch detectou PCBs em pellets plásticos no Brasil, com concentrações variando de 43 a 3892 ng/g (Mukai, 2023). Além disso, a pesquisa publicada na *Chemosphere* (2022) demonstrou que MPs não apenas adsorvem POPs, mas podem aumentar sua toxicidade em até 10 vezes, potencializando riscos à saúde humana e à biota (Rubin; Zucker, 2022).

Os microplásticos são os precursores dos nanoplásticos (NPs), uma vez que, nos oceanos, os MPs sofrem degradações físicas, químicas e biológicas. A geração de NPs amplifica os efeitos ambientais, já que, esses possuem maior mobilidade, maior capacidade de penetração em organismos e tem maior propensão a se

agregarem nos sistemas (Pradel; Catrouillet; Gigault, 2023).

A consequência dos microplásticos para a água

A água é a fonte primordial de vida que sustenta todo o equilíbrio da natureza. É essencial para o desenvolvimento de todos os seres vivos do planeta e, apesar de ser um recurso natural em abundância, a falta de cuidado com seu uso é um grande problema atualmente.

Cerca de 97,5% da água do planeta encontra-se nos mares, ou seja, não é considerada ideal para consumo humano. Dos 2,5% restantes, apenas 1% é de fácil acesso encontrado em rios e lagos. Somente no Brasil, cerca de 33 milhões de pessoas não tiveram acesso à água potável em 2022, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Conforme a Lei nº 11.445/2007, entende-se como saneamento básico o conjunto de infraestruturas de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Além de ser importante para a preservação ambiental, o saneamento público permite dignidade, segurança e saúde às pessoas.

No último Censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, no ano de 2022, algumas melhorias foram notadas com relação ao último, que havia sido realizado em 2010. O descarte adequado de esgoto deixou de ser 64,5% e subiu para 75,7%. Já a coleta de lixo, foi de 85,8 para 90,9% e o percentual de pessoas vivendo com ligação à rede geral de água foi de, aproximadamente, 80% para 86,6%. Porém, ainda assim, 24% da população vive em residências sem descarte adequado de esgoto, 9% sem a coleta de resíduos e 3% sem abastecimento de água (IBGE, 2023). Dessa forma, a realidade para essa parcela da população sem saneamento público é outra.

Em uma pesquisa bibliográfica feita por Almeida *et al.* (2024), é possível observar as principais doenças relacionadas à falta de saneamento básico, sendo a diarreia e a dengue as mais citadas (Teixeira *et al.*, 2014). E ainda, a falta de acesso ao saneamento favorece parasitas intestinais em crianças de até seis anos. Apontaram também que ocorreram 13.929 internações entre os anos de 2010 e 2014 (Siqueira *et al.*, 2017) e 25% dessas necessitaram do uso de Unidade de Terapia Intensiva (UTI), sendo em maioria idosos (maiores que 75 anos) e crianças (menores de 4 anos).

Esses dados revelam que, mesmo sendo crescente o número de pessoas com saneamento público em 12 anos, a realidade do povo que não possui é diferente, ficando mais expostos a doenças, gerando uma exclusão social e até um problema para os cofres públicos, já que, muito dinheiro é gasto nessas

milhares de internações por doenças vinculadas ao saneamento. Desse número de internações entre esses quatro anos, mais de 6,1 milhão de reais foram gastos do dinheiro público (Siqueira *et al.*, 2017). Um valor expressivo que poderia ser investido efetivamente para o saneamento já que, comparativamente, o investimento em saneamento básico gera um retorno quatro vezes maior na economia de gastos com saúde (Salla *et al.*, 2019).

A ausência de saneamento básico também tem impactos significativos no meio ambiente, uma vez que o descarte inadequado de esgoto doméstico e resíduos sólidos, sobretudo em áreas periféricas ou não urbanizadas, acaba sendo direcionado para corpos hídricos sem qualquer tratamento. Um estudo da Universidade Federal do Pará revelou que apenas 2,6% dos 313 municípios da bacia amazônica possuem saneamento adequado (Morais *et al.*, 2024). Essa deficiência contribui para a entrada de lixo e microplásticos em rios, afetando espécies aquáticas, cadeias alimentares e habitats, com impactos em múltiplos níveis ecológicos.

Além disso, esse despejo contínuo não afeta apenas a qualidade da água doce, como também alimenta o acúmulo de poluentes nos oceanos, com cerca de 80% dos resíduos plásticos oceânicos provenientes de fontes terrestres, transportados por rios devido à falta de tratamento de esgoto e descarte inadequado, contribuindo para um fluxo projetado de até 37 milhões de toneladas de plásticos por ano até 2040 (PNUMA, 2021). Esses poluentes se dispersam amplamente nos ecossistemas aquáticos e atingem diretamente os organismos marinhos, uma vez que entram na cadeia alimentar de forma quase imperceptível.

As partículas de microplásticos são facilmente ingeridas pelos peixes, devido a sua similaridade com partículas naturais, como plânctons, e essas geram impactos negativos às espécies marinhas: a inibição de crescimento, o estresse oxidativo, problemas de digestão e até genotoxicidade, por exemplo (Khan *et al.*, 2024). Pesquisas mostram que, na costa brasileira, foram encontrados de 12 a 16 partículas por grama de microplásticos em tecidos de moluscos, animais que pesam em média 5g (Ribeiro *et al.*, 2023).

Presença de microplásticos na água potável

O problema dos microplásticos se tornou um pesadelo em todo o planeta. Na Europa, um estudo envolvendo nove dos maiores rios europeus indicou que 65% desses apresentam partículas de microplásticos flutuantes na camada superficial e 35% de microplásticos mais densos estão se dispersando para camadas mais profundas (Ghiglione; ter Halle, 2025).

Estudos realizados em Brasília (DF) detectaram microplásticos na água de

torneira do Plano Piloto (região central da capital), indicando uma presença significativa dessas partículas na água consumida pela população (Teotônio, 2020). Goerck (2023) investigou a presença de microplásticos em água potável e os possíveis riscos de ingestão. Seu estudo apontou que processos de tratamento convencionais, como coagulação e filtração, não eliminam completamente os microplásticos, estimando uma ingestão diária de 69 µg dessas partículas, com potenciais efeitos carcinogênicos, mutagênicos e toxicidade aguda para a saúde (Mandalho; Cardoso; Fonseca, 2024).

Uma revisão sistemática de Danopoulos, Twiddy e Rotchell (2020) analisou doze estudos sobre contaminação de água potável, tanto de torneira quanto engarrafada. O maior nível de contaminação foi encontrado em água engarrafada (4.889 MP/L), valor 7,8 vezes superior ao máximo registrado em água de torneira (628 MP/L), mas diferenças nos protocolos dificultam a comparação precisa entre os estudos. Em escala global, a contaminação por microplásticos em água potável ainda é pouco estudada, tornando incerta a comparação entre níveis em águas engarrafadas e de torneira.

Um problema de saúde pública

Os microplásticos têm levantado preocupações significativas sobre os impactos na saúde humana devido à exposição contínua por meio de inalação, ingestão ou contato dérmico, que leva à sua distribuição pelo corpo. Os MPs podem adsorver metais pesados, aditivos químicos e patógenos, que acabam sendo ingeridos com alimentos e, em alguns casos, já foram detectados no leite materno, gerando preocupação com efeitos a longo prazo e para futuras gerações (Bugatti *et al.*, 2023; Olivatto, 2018).

Nesses casos, a microscopia de fluorescência e FTIR (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier) são utilizadas para identificar a presença dessas partículas que, além do leite materno, já estão sendo encontradas em leites de animais e produtos derivados (fórmulas, iogurtes e queijos) e, também, em leites vegetais (Carpi-souza; Rocha; Tavares, 2025).

Essas partículas causam danos físicos, químicos e biológicos. Fisicamente, podem provocar inflamação e atravessar barreiras naturais do corpo. Quimicamente, têm a capacidade de acumular substâncias tóxicas, levando à contaminação da cadeia alimentar e dos organismos que consomem MPs. Biologicamente, podem estar associados a patógenos que representam risco à saúde humana (Bugatti *et al.*, 2023).

A ingestão de MPs pode levar a obstruções gastrointestinais e má absorção de nutrientes (Carbery *et al.*, 2018). Além disso, o contato prolongado está ligado a inflamações, danos celulares e estresse oxidativo, com potencial para atravessar

barreiras como a hematoencefálica e a placenta (Mercogliano *et al.*, 2020). Embora ainda haja incertezas sobre o trajeto dos MPs no organismo, já foram associados a doenças respiratórias, cardiovasculares, infecciosas, câncer e problemas reprodutivos (Huang *et al.*, 2021).

Um estudo recente apontou a presença de microplásticos de polietileno em rins, fígado e cérebro humano (Nihart *et al.*, 2025), este último com maior concentração dessas partículas. Além do polietileno, PET, polipropileno, policloreto de vinila (PVC) e nylon-6 foram citados como mais encontrados em tecidos desses mesmos órgãos, todos com um formato de lascas. Ainda, essa pesquisa observou a presença dessas substâncias em maior quantidade, dispostas nas paredes cerebrovasculares e células imunes, em cérebros falecidos com diagnósticos de demência.

Processo de despolimerização (reciclagem química)

A reciclagem química decompõe a cadeia polimérica por despolimerização, gerando monômeros ou oligômeros brutos que podem ser reutilizados na síntese de novos polímeros, além de produzir subprodutos valiosos (Ghosal; Nayak, 2022). Existem alguns tipos de processos que podem gerar a despolimerização, como: solvólise, métodos térmicos e métodos térmicos/catalíticos. O método de solvólise engloba glicólise, hidrólise e a alcoólise, três grandes destaques na reciclagem química do PET (Khan, 2022).

A glicólise propriamente dita é a quebra de uma molécula de glicose ($C_6H_{12}O_6$), transformando-a em duas moléculas de piruvato ($C_3H_4O_3$), por meio de uma via anaeróbia. No corpo humano, a glicólise acontece a fim de gerar energia em forma de ATPs (adenosina trifosfato) que, por sua vez, é responsável por armazenar e fornecer energia para praticamente todas as funções celulares.

Já a hidrólise é uma reação na qual uma molécula é quebrada ao adicionar uma molécula de água. Nesse caso, a água é vista como reagente e fornece um grupo hidroxila (OH^-) e um próton (H^+) que vão se ligar com a molécula original. Geralmente, esse processo é utilizado para quebrar ligações covalentes em moléculas muito complexas - o próprio ATP, por exemplo.

A alcoólise é um método de transesterificação, no qual um éster, com a interação de um álcool, dá origem a outro éster. Esse processo pode ser nomeado de acordo com o álcool utilizado, por exemplo: ao usar o etanol, o processo passa a se chamar especificamente de etanólise. Assim acontece com os outros alcoóis. No processo de etanólise, geralmente é utilizado um excesso de etanol no processo e o PET é fundido com adição de um catalisador, podendo ser de caráter básico ou ácido (Spinacé; De Paoli, 2005).

No contexto da despolimerização, a hidrólise não se torna uma rota benéfica. Esse processo possui desvantagens significativas como: necessidade de temperaturas muito altas (200-250°C), pressões de até 1,4–2 MPa e longo tempo de duração. Além disso, é um processo com alto custo de purificação do TPA reciclado (Damayanti; Wu, 2021). Nesses casos, a utilização da rota por alcoólise pode ser uma alternativa, como um dos principais benefícios dessa rota é a facilidade de reciclagem dos alcoóis e etilenoglicol resultantes.

A utilização de catalisadores nas reações químicas de despolimerização

Devido a necessidade de aumento da velocidade de reação, seletividade e melhora no rendimento das reações (Dutra, 2023), podem ser utilizados catalisadores durante o processo de reciclagem química. Eles facilitam a formação de produtos por precisarem de menor energia, permitindo condições mais brandas, maior eficiência e seletividade e, também, a possibilidade de reciclo dos mesmos. Em aplicações industriais e laboratoriais, catalisadores como líquidos iônicos ou enzimas otimizam processos, economizam energia e minimizam subprodutos, alinhando-se a práticas sustentáveis (Smith *et al.*, 2014).

Alternativas catalíticas, como os solventes neotéricos, estão sendo estudadas para melhorar a reciclagem química do PET. Entre esses solventes, os líquidos iônicos (LIs), solventes eutéticos profundos e fluidos supercríticos apresentam inovações significativas, permitindo a dissolução seletiva dos polímeros em condições de temperatura e pressão mais baixas do que os métodos convencionais, o que aumenta a eficiência e reduz o impacto ambiental (Clarke *et al.*, 2018). Em especial, os LIs, compostos por íons e líquidos à temperatura ambiente, destacam-se por sua estabilidade térmica, forte capacidade de solvatação, baixa inflamabilidade, e reciclabilidade, alinhando-se aos princípios da economia circular (Zhang *et al.*, 2023).

Na reciclagem química, os LIs têm se mostrado eficazes na despolimerização em condições mais brandas, permitindo uma recuperação facilitada tanto dos produtos quanto dos próprios LIs (Khoo *et al.*, 2021). Eles podem atuar isoladamente ou combinados com água, etanol ou etilenoglicol para promover diferentes processos, como a hidrólise, etanólise ou glicólise (Cano *et al.*, 2020).

Na Tabela 2 estão relatados alguns líquidos iônicos encontrados na literatura utilizados como catalisadores em reações de despolimerização com diferentes polímeros.

Observando a Tabela 2, verifica-se o uso de diversos LIs, indicando que essa classe de compostos apresenta potencial como alternativa para a reciclagem química de diversos polímeros. Entre eles, Kamimura e Yamamoto (2008) desenvolveram um método inovador para despolimerização de poliamidas,

especificamente Nylon-6 e Nylon-12, utilizando líquidos iônicos a 300 °C. O líquido iônico N-metil-N-propilpiperidínio bis(trifluorometilsulfonyl)imida ([PP13][NTf₂]), com 5% em peso de DMAP como catalisador, obteve o melhor desempenho, alcançando 86% de rendimento de caprolactama a partir do Nylon-6 por destilação direta, sendo reutilizável por cinco ciclos (rendimentos de 77–87%). A despolimerização do Nylon-12 foi menos eficiente, com rendimentos de 7–17% de lauro lactama. O método destaca o potencial dos líquidos iônicos para reciclagem química sustentável de poliamidas sob pressão normal (Kamimura; Yamamoto, 2008).

Silva *et al.* (2018) analisaram que a glicólise de PET pós-consumo, otimizada com o catalisador líquido iônico [Bmin]ZnCl₃, alcançou um rendimento máximo de aproximadamente 50% de monômero BHET nas condições de 120 minutos, 190 °C e razão mássica etilenoglicol:PET de 10:1, utilizando um delineamento Box-Behnken. Esse resultado, validado por um modelo estatístico robusto (R² = 95,15%), destacou a influência significativa de temperatura e tempo, com o catalisador reduzindo a energia de ativação para 36,49 kJ/mol, um valor inferior aos reportados na literatura, evidenciando alta eficiência na reciclagem química do PET (Silva *et al.*, 2018).

Liu *et al.* (2013) investigaram a alcoólise de polietileno tereftalato (PET) com n-butanol, utilizando o líquido iônico ácido Brønsted-Lewis ([HO₃S-(CH₂)₃-NEt₃]Cl-ZnCl₂, x=0,67) como catalisador, conforme publicado no Journal of Applied Polymer Science. A reação a 205 °C por 8 horas resultou em 100% de conversão de PET, com rendimentos de 95,3% de dibutil tereftalato (DBTP) e 95,7% de etilenoglicol (EG). O líquido iônico demonstrou excelente reutilização, mantendo alta conversão e rendimentos após sete ciclos, devido à sinergia entre os sítios ácidos Brønsted e Lewis, destacando seu potencial para reciclagem química eficiente e sustentável de PET (Liu *et al.*, 2013).

A investigação da despolimerização de PET com líquidos iônicos ácidos de Brønsted sob irradiação de micro-ondas revela alta eficiência na hidrólise do polímero. Utilizando o líquido iônico [Hexanemim][HSO₄] como catalisador, com dosagem de 0,01 mol/2 g de PET, temperatura de 195°C e tempo de reação de 210 minutos, alcança-se conversão significativa do PET em monômeros reutilizáveis. A análise ortogonal destaca o tipo de catalisador como fator principal, seguido por tempo e temperatura, evidenciando a importância da seleção do líquido iônico para otimizar o processo. Esses resultados reforçam o potencial dos líquidos iônicos em promover reações de despolimerização em condições controladas (Liu *et al.*, 2014).

Tabela 2 - Líquidos iônicos utilizados como catalisadores na despolimerização de diferentes tipos de polímeros

Autor	Líquido Iônico	Polímero	Ano
<i>Yue et al.</i>	[Bmim][ZnCl ₃]	poli(tereftalato de etileno)	2014
<i>Nunes et al.</i>	[Bmim][BF ₄]	poli(tereftalato de etileno)	2013
<i>Silva et al.</i>	[Bmin][ZnCl ₃]	poli(tereftalato de etileno)	2018
<i>Al-Sabagh et al.</i>	[Bmim-Fe][OAc] ₃	poli(tereftalato de etileno)	2015
<i>Adams et al.</i>	[Emim][AlCl ₄]	polietileno	2000
<i>Wang et al.</i>	[bmim][Cl]	poli(tereftalato de etileno)	2009
<i>Liu et al.</i>	[HO ₃ S-(CH ₂) ₃ -NEt ₃ Cl-ZnCl ₂]	poli(tereftalato de etileno)	2013
<i>Kamber et al.</i>	dietileno glicol monometil éter sulfato de 1-butil-3-metilimidazólio	poli(tereftalato de etileno)	2010
<i>Kamimura & Yamamoto</i>	N-metil-N-propilpiperidínio bis(trifluorometilsulfonil) imida ([PP13][NTf ₂])	nylon-6	2008
<i>Liu et al.</i>	[Hexanemim][HSO ₄]	poli(tereftalato de etileno)	2014
<i>Scé et al.</i>	(dimim)[FeCl ₄]	poli(tereftalato de etileno)	2019

Fonte: Autoria própria (2025)

Perspectivas futuras

O avanço das tecnologias de despolimerização, especialmente com o uso de líquidos iônicos, abre novas perspectivas para a gestão sustentável de resíduos plásticos. A capacidade dos LIs de operar em condições mais brandas, com alta seletividade e reutilização, sugere um futuro promissor para a reciclagem química, reduzindo a dependência de processos intensivos em energia e minimizando impactos ambientais. Além disso, a integração de LIs com outras tecnologias, como irradiação por micro-ondas ou solventes eutéticos profundos, pode aumentar a eficiência e viabilidade econômica da reciclagem de polímeros complexos, como PET e nylon.

No entanto, desafios permanecem, como a necessidade de escalonamento industrial, redução de custos e avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida dos LIs. Investimentos em pesquisas interdisciplinares e políticas públicas que incentivem a economia circular serão cruciais para transformar essas inovações em soluções práticas, mitigando a crise dos microplásticos e promovendo a preservação dos ecossistemas.

Conclusão

A crescente geração de resíduos sólidos, em especial os plásticos, têm demandado soluções inovadoras para o tratamento desses materiais, cujos impactos ambientais já são amplamente estudados. A presença de microplásticos em ambientes marinhos e na água potável evidencia, não apenas a persistência desses poluentes no meio ambiente, mas também a necessidade urgente de novas estratégias de mitigação.

Este estudo destacou a gravidade da contaminação por microplásticos em ecossistemas aquáticos e terrestres, sua entrada na cadeia alimentar e os riscos associados à saúde humana, incluindo toxicidade e doenças crônicas. Nesse contexto, as estratégias de despolimerização utilizando líquidos iônicos emergem como uma solução promissora, oferecendo uma abordagem mais sustentável para a reciclagem química de plásticos, com alta eficiência e menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Preview 2022:** as indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. [S. l.]: ABIPLAST, 2022. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/04/Preview2022_web.pdf. Acesso em: 9 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. [S. l.]: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 9 maio 2025.

ADAMS, C. J.; EARLE, M. J.; SEDDON, K. R. Catalytic cracking reactions of polyethylene to light alkanes in ionic liquids. **Green Chemistry**, Cambridge, v. 2, n. 1, p. 21-24, 2000. DOI: 10.1039/A908167D. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/A908167D>. Acesso em: 9 maio 2025.

ALMEIDA, S. B. S.; OLIVEIRA, P. de J.; SOUZA, A. M. N. de; SOUZA, I. L. L. de. A relação entre a falta de saneamento básico, o aumento das doenças infecciosas e dos gastos públicos: revisão sistemática de literatura. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 7, n. 2, p. e68014, 2024. DOI: 10.34119/bjhrv7n2-090. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJHR/article/view/68014>. Acesso em: 24 abr. 2025.

AL-SABAGH, A.M. *et al.* Ionic liquid-coordinated ferrous acetate complex immobilized on bentonite as a novel separable catalyst for PET glycolysis, **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 54, 2015, 12474312481. DOI: 10.1021/ACS.IECR.5B03857. Acesso em: 9 maio 2025.

Associação Nacional dos Catadores. **Atlas Brasileiro de Reciclagem**. ANCAT, 2023. Disponível em: <https://atlasbrasileirodareciclagem.ancat.org.br/reciclagem-em-numeros#:~:text=Foram%20gerados%2081%2C8%20milh%C3%B5es,foram%20materiais%20reaproveit%C3%A1veis%20e%20recicl%C3%A1veis>. Acesso em: 24 maio 2025.

BARBOZA, L. G. A., LOPES, C., OLIVEIRA, P., BESSA, F., OTERO, V., HENRIQUES, B., RAIMUNDO, J., CAETANO, M., VALE, C., & GUILHERMINO, L. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. **Science of The Total Environment**, 717, 134625, 2020. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.134625. Acesso em: 16 mar. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 4, p. 1-4, 8 jan. 2007.

BUGATTI, C. *et al.* Microplásticos e Nanoplásticos e sua relevância na saúde

humana: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, e6712139302, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i1.39302. Acesso em: 12 fev. 2025.

CANEVAROLO, J. R., SEBASTIÃO, V. **Ciência dos polímeros**. São Paulo, v. 24, 2002.

CANO, I. *et al.* Paramagnetic ionic liquid-coated SiO₂@ Fe₃O₄ nanoparticles—The next generation of magnetically recoverable nanocatalysts applied in the glycolysis of PET. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 260, p. 118110, 2020. DOI:10.1016/j.apcatb.2019.118110. Acesso em: 14 abr. 2025.

CARBERY, M. *et al.* Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. **Environmental International**, v. 115: p. e400-409, 2018. DOI: 10.1016/j.envint.2018.03.007 Acesso em: 24 abr. 2025.

CARPI-SOUZA, O. C.-S.; ROCHA, L. V. M. da; TAVARES, M. I. B. Microplásticos presentes no leite ofertado na primeira infância. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 8, n. 1, p. e76878, 2025. DOI: 10.34119/bjhrv8n1-204. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJHR/article/view/76878>. Acesso em: 24 abr. 2025.

CHARLES, D & KIMMAN, L. **Plastic Waste Makers Index 2023**, Minderoo Foundation, 2023. Disponível em: <https://cdn.minderoo.org/content/uploads/2023/02/04205527/Plastic-Waste-Makers-Index-2023.pdf>. Acesso em 24 abr. 2025.

CLARKE, C. J., TU, W.-C., LEVERS, O., BRÖHL, A., & HALLETT, J. P. Green and Sustainable Solvents in Chemical Processes. **Chemical Reviews**, 118(2), 747–800, 2018. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00571

CONSORTI, C. S., SOUZA, R. F. DE ., DUPONT, J., & SUAREZ, P. A. Z. Líquidos iônicos contendo o cátion dialquilimidazólio: estrutura, propriedades físico-químicas e comportamento em solução. **Química Nova**, 24(6), 830–837, 2001. DOI: 10.1590/S0100-40422001000600021

COWGER W, WILLIS KA, BULLOCK S, *et al.* Global producer responsibility for plastic pollution. **Sci Adv**, v.10, p. 17, 2024. DOI:10.1126/sciadv.adj8275.

DAMAYANTI; WU, Ho-Shing. Strategic possibility routes of recycled PET. **Polymers**, v. 13, n. 9, p. 1475, 2021. DOI: 10.3390/polym13091475

DANOPOULOS, E.; TWIDDY, M.; ROTCHELL, J. M. Microplastic contamination of drinking water: A systematic review. **PloS one**, v. 15, n. 7, p. e0236838, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0236838

DE FATIMA FILLA, G.; MOREIRA, T. P.; BUSSOLARO, D. Presença de resíduos plásticos no trato digestório de tainhas (*Mugil liza*) do estuário de Cananeia, sudeste do Brasil. **Biodiversidade Brasileira**, v. 14, n. 1, p. 64-77, 2024. DOI: 10.37002/biodiversidadebrasileira.v14i1.2460

DUTRA, G. V. S. **Líquidos iônicos em processos de polimerização**: estudos sobre seu uso como catalisador na polimerização catiônica de estireno e monômero na síntese de terpolímeros hidrofílicos. 2023. 168 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade de Brasília, Brasília, 2023. Disponível em: [http://repositorio2.unb.br/bitstream/10482/45581/1/2020_GabrielVictorSim%
%b5esDutra.pdf](http://repositorio2.unb.br/bitstream/10482/45581/1/2020_GabrielVictorSim%c3%b5esDutra.pdf). Acesso em: 10 jan. 2025.

GHIGLIONE, J.F., TER HALLE, A. Source, fate, and effects of plastic litters in the European land-sea continuum. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 10021–10022, 2025. DOI: 10.1007/s11356-024-35827-w

GHOSAL, K.; NAYAK, C. Recent advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate waste into value added products for sustainable coating solutions—hope vs. hype. **Materials Advances**, v. 3, n. 4, p. 1974-1992, 2022. DOI: 10.1039/d1ma01112j

GOERCK, J. **Microplásticos em água para consumo humano**: diagnóstico e avaliação de riscos à saúde humana. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/31626>. Acesso em: 15 mar. 2025.

HO, W. K. *et al.* Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. **Environmental Science & Technology Letters**, 10 (1), 27-32, 2023. DOI: 10.1021/acs.estlett.2c00689

HUANG, W. *et al.* Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. **Journal of Hazardous Materials**, 405: e124187, 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124187.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**: características dos domicílios e do entorno. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/22827-censo-demografico-2022>. Acesso em: 24 abr. 2025.

KENNEDY, J. **Dissolver o problema dos resíduos de plástico**: as novas tecnologias estão à altura dos desafios? *InterPLAST*, 2024. Disponível em: <https://www.interplast.pt/Artigos/569327-Dissolver-problema-dos-residuos-plastico-as-novas-tecnologias-estao-a-altura-dos-desafios.html>. Acesso em: 5 maio 2025.

KAMIMURA, A. AND YAMAMOTO, S. A novel depolymerization of nylons in ionic liquids. **Polym. Adv. Technol.**, 19: 1391-1395, 2008. DOI: 10.1002/pat.1199

KHAN, A. *et al.* Efficient chemical recycling of waste polyethylene terephthalate. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 187, p. 106639, 2022. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106639

KHAN, M.L., HASSAN, H.U., KHAN, F.U., GHEFFAR, R.A., RAFIQ, N., BILAL, M., KHOOHARO, A.R., ULLAH, S., JAFARI, H., NADEEM, K., SIDDIQUE, M.A.M., ARAI, T. Efeitos dos microplásticos na saúde dos peixes de água doce e as implicações para a saúde humana. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, 2024. DOI: 10.1590/1519-6984.272524. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/7b6MjqyC3gwb7nxqvVjKfzy/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 24 abr. 2025.

KHOO, K. S. *et al.* How does ionic liquid play a role in sustainability of biomass processing? **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124772, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124772

LIU, N., MA, Y. S., SHU, K. W., WU, B., & ZHANG, D. Catalysis Investigation of PET Depolymerization with Brønsted Acidic Ionic Liquid under Microwave Irradiation. **Advanced Materials Research**, 893, 23–26, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.893.23

LIU, S., HUANG, J. H., ZHANG, W., SHI, L. X., YI, K. X., YU, H. B., ZHANG, C. Y., LI, S. Z., & LI, J. N. Microplastics as a vehicle of heavy metals in aquatic environments: A review of adsorption factors, mechanisms, and biological effects. **Journal of Environmental Management**, 302, 113995, 2022. DOI: 10.1016/J.JENVMAN.2021.113995

LIU, S., WANG, Z., LI, L., YU, S., XIE, C. AND LIU, F. Butanol alcoholysis reaction of polyethylene terephthalate using acidic ionic liquid as catalyst. **J. Appl. Polym. Sci.**, 130: 1840-1844, 2013. DOI: 10.1002/app.39246

MANDALHO, L.; CARDOSO, A.; FONSECA, C.. Microplásticos Em Águas Potáveis E Seus Efeitos Na Saúde Humana. **Revista Multidisciplinar em Saúde**, V. 5, Nº 2, 2675-8008, 2024. DOI: 10.51161/conbrasau2024/35077

MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo, 1999. E-book. p.18. ISBN 9788521217251. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521217251/>.
Acesso em: 21 abr. 2025.

MAO, R., LANG, M., YU, X., WU, R., YANG, X., & GUO, X. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals. **Journal of Hazardous Materials**, 393, 122515, 2020. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.122515

MATHI, C. **Microplásticos**: os contaminantes emergentes no contexto da ecotoxicologia. 2018. 127 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/475fec2-5a42-4bbe-8d01-432cdc039a15/Mathi_Caroline_tcc.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.

MATO, Y., *et al.* Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. **Environmental Science & Technology**, 35(2), 318–324, 2001.

MERCOGLIANO, R. *et al.* Occurrence of Microplastics in Commercial Seafood under the Perspective of the Human Food Chain. A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 68(19): 5296–5301, 2020. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c01209

MONTAGNER, C. C., DIAS, M. A., PAIVA, E. M., & VIDAL, C. MICROPLÁSTICOS: OCORRÊNCIA AMBIENTAL E DESAFIOS ANALÍTICOS. **Química Nova**, 44(10), 1328–1352, 2021. DOI: 10.21577/0100-4042.20170791

MORAIS, L. M. S. *et al.* Microplastics in the Amazon biome: State of the art and future priorities. **Heliyon**, v. 10, n. 7, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28851

KAMBER, N. E.; TSUJII, Y.; KEETS, K.; WAYMOUTH, R. M.; PRATT, R. C.; NYCE, G. W.; HEDRICK, J. L. The Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Using N-Heterocyclic Carbenes from Ionic Liquids. **Journal of Chemical Education**, 87, 5, 519–521, 2010. DOI: 10.1021/ed800152c

NEVES, V. L. B. das. **Reciclagem Química Conduzida Pelo Uso De Líquidos Iônicos, Como Estratégia Para Mitigar A Poluição Por Microplásticos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. 106 f. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/78750/3/2024_dis_vlbneves.pdf. Acesso em: 14 jan. 2025.

NIHART, A. & GARCIA, M. & EL HAYEK, E. *et al.* Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. **Nature Medicine**. 1-6, 2025. DOI: 10.1038/s41591-024-03453-1.

NUNES, C.; BUENO, P. V. A.; FREITAS, A. R.; SILVA, D. C.; ROSA, F. A.; RUBIRA, A. F.; MUNIZ, E. C. Despolimerização de PET em etanol supercrítico catalisada pelo líquido iônico [BMIM][BF₄]: estudo da influência da água e de corantes (usados em garrafas PET) como interferentes da reação. In: Congresso Brasileiro De Polímeros, 12, 2013, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Brasileira de Polímeros, 2013. p. 1-4.

OLIVATTO, G. P.; CARREIRA, R.; TORNISIELO, V. L.; MONTAGNER, C. C. Microplásticos: Contaminantes de Preocupação Global no Antropoceno. **Rev. Virtual Quim.**, 10 (6), 1968-1989, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180125

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Resolução A/RES/70/1, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PRADEL, A.; CATROUILLET, C. & GIGAULT, J. The environmental fate of nanoplastics: What we know and what we need to know about aggregation. **NanoImpact**, 29, 100453, 2023. DOI: 10.1016/J.IMPACT.2023.100453

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution**. Nairobi: PNUMA, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>. Acesso em: 2 mai. 2025.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE; INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an Age of Waste – Turning Rubbish into a Resource**. Nairobi: PNUMA, 2024. Disponível em: . Acesso em: 7 maio 2025.

RIBEIRO, V. V.; NOBRE, C. R.; MORENO, B. B.; SEMENSATTO, D.; SANZ-LAZARO, C.; MOREIRA, L. B.; CASTRO, I. B. Oysters and mussels as equivalent sentinels of microplastics and natural particles in coastal environments. **Science of The Total Environment**, V. 874, 162468, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162468

RUBIN, A. E., & ZUCKER, I. Interactions of microplastics and organic compounds in aquatic environments: A case study of augmented joint toxicity. **Chemosphere**, 289, 133212, 2022. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.133212

SALLA, M. R. *et al.* Relação entre saneamento básico e saúde pública em Bissau, Guiné-Bissau. **Saúde e Sociedade**, v. 28, n. 4, p. 284-296, 2019. DOI: 10.1590/S0104-12902019180705

SCÉ, F., CANO, I., MARTIN, C., BEOBIDE, G., CASTILLO, O., & DE PEDRO, I. Comparing conventional and microwave-assisted heating in PET degradation mediated by imidazolium-based halometallate complexes. **New Journal of Chemistry**, 43(8), 3476-3485, 2019. DOI: 10.1039/C8NJ06090H

SILVA, C. V. G.; SILVA FILHO, E. A.; ULIANA, F.; JESUS, L. F. R.; MELO, C. V. P.; BARTHUS, R. C.; RODRIGUES, J. G. A.; VANINI, G. PET glycolysis optimization using ionic liquid [Bmin]ZnCl₃ as catalyst and kinetic evaluation. **Polímeros**, v. 28, n. 5, p. 450-459, 2018. DOI: 10.1590/0104-1428.00418. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/5ChznMyFXsVrwKDMkxVBBrg/>. Acesso em: 9 mai. 2025

SILVA, G. S.; SUMIDA, P. Y. G. **Micropoluentes no mar profundo: influência do modo alimentar na ingestão de microplásticos em organismos bentônicos e detecção de poluentes orgânicos persistentes em amostras biológicas e de sedimento.** 2023. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos.** SINIR, 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SIQUEIRA, M. S. *et al.* Internações por doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado na rede pública de saúde da região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010-2014. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 26, n. 4, p. 795-806, 2017. DOI: 10.5123/S1679-49742017000400011

SMITH, E. L., ABBOTT, A. P., & RYDER, K. S. Deep Eutectic Solvents (DESs) and

Their Applications. **Chemical Reviews**, 114(21), 11060–11082, 2014. DOI: 10.1021/cr300162p

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Falta de acesso à água potável atinge 33 milhões de pessoas no Brasil**. Agência Brasil, 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-03/falta-de-acesso-agua-potavel-atinge-33-milhoes-de-pessoas-no-brasil#:~:text=%E2%80%9CEm%20m%C3%A9dia%2C%2033%20milh%C3%B5es%20de,100%25%20de%20abastecimento%20de%20%C3%A1gua>. Acesso em: 24 maio 2025.

SPINACÉ, M. A. DA S., & DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, 28(1), 65–72, 2005. DOI: 10.1590/S0100-40422005000100014

TEIXEIRA, J. C. *et al.* Estudo do impacto das deficiências de saneamento básico sobre a saúde pública no Brasil no período de 2001 a 2009. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 87-96, 2014. DOI: 10.1590/S1413-41522014000100010

TEOTÔNIO, M. H. R. **Presença de microplásticos em água de torneira no Plano Piloto uma região administrativa de Brasília**. 2020. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/38773>

UNIVASF Sustentável. **Microplástico**: um dos principais poluentes dos oceanos, Petrolina, 2019. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/microplastico-um-dos-principais-poluentes-dos-oceanos>. Acesso em: 09 jun. 2025.

WANG, H., LI, Z., LIU, Y., ZHANG, X., & ZHANG, S. Degradation of poly (ethylene terephthalate) using ionic liquids. **Green Chemistry**, 11(10), 1568-1575, 2009. DOI: 10.1039/B906831G

XIA, Y., NIU, S., & YU, J. Microplastics as vectors of organic pollutants in aquatic environment: A review on mechanisms, numerical models, and influencing factors. **Science of The Total Environment**, 887, 164008, 2023. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.164008

YUE, Q. F.; YANG, H. G.; ZHANG, M. L.; BAI, X. F. Metal-containing ionic liquids: highly effective catalysts for degradation of poly(ethylene terephthalate). **Adv.**

Mater. Sci. Eng., v. 2014, p. 1–6, 2014. DOI:10.1155/2014/454756

ZARFL, C., & MATTHIES, M. Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic? **Marine Pollution Bulletin**, 60(10), 1810–1814, 2010. DOI: 10.1016/J.MARPOLBUL.2010.05.026

ZHANG, R. *et al.* Light-Colored rPET Obtained by Nonmetallic TPA-Based Ionic Liquids Efficiently Recycle Waste PET. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 62, n. 30, p. 11851-11861, 2023. DOI:10.1021/acs.iecr.3c01468

