



VOLUME 19

JACKLINE FREITAS BRILHANTE DE SÃO JOSÉ
ÉRICA AGUIAR MORAES
(org.)

Inovação no processamento de alimentos



Esta obra foi selecionada para integrar a “Coleção Pesquisa Ufes II”, a partir de Chamada Pública feita pela Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) aos programas de pós-graduação da universidade.

A seleção teve por base pareceres que consideraram critérios de inovação, relevância e impacto.

O financiamento da Coleção foi viabilizado por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação (Proap) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e de recursos do Tesouro Nacional.



**Universidade Federal
do Espírito Santo**



Editora Universitária – Edufes

Filiada à Associação Brasileira
das Editoras Universitárias (Abeu)

Av. Fernando Ferrari, 514
Campus de Goiabeiras
Vitória – ES · Brasil
CEP 29075-910

+55 (27) 4009-7852
edufes@ufes.br
www.edufes.ufes.br

Reitor

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Vice-reitora

Sonia Lopes Victor

Chefe de Gabinete

Ana Paula Santana de Vasconcellos Bittencourt

Diretor da Edufes

Wilberth Salgueiro

Conselho Editorial

Ananias Francisco Dias Junior, Fátima Maria Silva,
Gleice Pereira, José André Lourenço, Margarete
Sacht Góes, Othon Souto Campos, Paulo Rogerio
Garcez de Moura, Rodrigo de Alvarenga Rosa,
Rogério Borges de Oliveira, Rosana Suemi
Tokumaru, Sandra Soares Della Fonte, Sergio
Lins de Azevedo Vaz, Telma Elita Juliano Valente

Secretaria do Conselho Editorial

Douglas Salomão

Administrativo

Josias Bravim, Washington Romão dos Santos

Seção de Edição e Revisão de Textos

Fernanda Scopel, George Vianna,
Jussara Rodrigues, Roberta Estefânia Soares

Seção de Design

Juliana Braga, Samira Bolonha Gomes

Seção de Livraria e Comercialização

Adriani Raimondi, Ana Paula Rubim,
Dominique Piazzarollo, Marcos de Alarcão,
Maria Augusta Postinghel

Produção Cultural

Déborah Pinto Corrêa



Este trabalho atende às determinações do Repositório Institucional do Sistema Integrado de Bibliotecas da Ufes e está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Projeto gráfico

Willi Piske Junior

Samira Bolonha Gomes

Revisão de texto, diagramação e capa

Alis Comunicação e Estratégia

Imagem da capa criada por: Jackline Freitas Brilhante de São José e Érica Aguiar Moraes através <https://gemini.google.com/>.

Supervisão

Edufes

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Editora Universitária – Edufes, ES, Brasil)

135 Inovação no processamento de alimentos [recurso eletrônico] /
Jackline Freitas Brilhante de São José, Érica Aguiar Moraes
(org.). Dados eletrônicos. – Vitória, ES : Edufes, 2026.
424 p. : il. ; PDF, 5.690 kB. - (Coleção Pesquisa Ufes II; 19)

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-7772-663-9

Modo de Acesso: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/774>

1. Tecnologia de alimentos. 2. Alimentos-conservação.
3. Sustentabilidade. I. São José, Jackline Freitas Brilhante de.
II. Moraes, Érica Aguiar. III. Série.

CDU: 664.8/.9

Elaborado por Ana Paula de Souza Rubim – CRB-6 ES-000998/O

Esta obra foi composta com
a família tipográfica Crimson Text.

**JACKLINE FREITAS BRILHANTE DE SÃO JOSÉ
ÉRICA AGUIAR MORAES
(org.)**

Inovação no processamento de alimentos

*Dedicamos este livro a todos os interessados
em conhecer e aprender mais sobre as
inovações no processamento dos alimentos.
Dedicamos essa obra também aos discentes,
egressos e docentes do Programa de Pós-
Graduação em Nutrição e Saúde da
Universidade Federal do Espírito Santo que,
com muita dedicação e esforço impulsionam
avanços na área de alimentos, dietética e
nutrição, promovendo saúde, sustentabilidade
e qualidade de vida para as gerações futuras.*

Agradecimentos

Agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade e apoio financeiro com os custos de publicação da presente obra que faz parte da Coleção Pesquisa Ufes.

Agradecemos ao Centro de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, que sempre apoiou o programa de Pós-graduação em Nutrição e Saúde (PPGNS).

Agradecemos à Fapes (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo), à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro dado ao PPGNS por meio de editais.

Nossos sinceros agradecimentos às agências de fomento Fapes, à Capes e ao CNPq, pelas bolsas concedidas aos seguintes autores: Rhaiza Marcia Passos Leal (bolsa de mestrado CNPq), Daniel Sgrancio Uliana (bolsa de iniciação científica Fapes e atualmente bolsa de mestrado Fapes), Laura Aparecida Perim (Bolsa de Iniciação científica Fapes), Ana Paula Rosa do Amaral (Bolsa de iniciação científica CNPq), Gabrielly Cristine Lamão Pontes (Bolsa de mestrado Capes), Guilherme Augusto Loiola Passos (Bolsa de mestrado Fapes), Aline Lopes (Bolsa de iniciação científica CNPq), Maria Julia Bernardone Lima (Bolsa de iniciação científica CNPq), Gabriela Luiz Meigre Dias

Pereira (Bolsa de Iniciação Científica Ufes) e à autora e organizadora Jackline Freitas Brilhante de São José (Bolsa Pesquisador Capixaba concedida pela Fapes).

Agradecemos ainda à Fapes e ao CNPq, pelos auxílios financeiros concedidos a projetos de pesquisa que envolveram os autores.

Por fim, agradecemos a todos os autores dos capítulos, pelo empenho e dedicação dispensados na produção, correção e publicação desta obra.

Os organizadores.

Sumário

Agradecimentos	7
Apresentação	12
Inovação na área de produção de alimentos.....	14
<i>Érica Aguiar Moraes • Jackline Freitas Brilhante de São José</i>	
Métodos alternativos aos compostos clorados na sanitização de frutas e hortaliças	66
<i>Bárbara Morandi Lepaus • Priscila Donatti Leão Alvarenga • Jackline Freitas Brilhante de São José</i>	
Ultrassom na conservação de frutas, hortaliças e sucos: princípios e aplicações.....	101
<i>Bárbara Morandi Lepaus • Jackline Freitas Brilhante de São José</i>	
Irradiação de alimentos: desafios, avanços e aplicações.....	134
<i>Bárbara Morandi Lepaus • Jackline Freitas Brilhante de São José</i>	
Campo elétrico pulsado na conservação de alimentos: princípios e aplicações.....	160
<i>Daniel Sgrancio Uliana • Bárbara Morandi Lepaus • Jackline Freitas Brilhante de São José</i>	

Aplicação de radiação ultravioleta no processamento de alimentos	183
---	------------

Daniel Sgrancio Uliana • Bárbara Morandi Lepaus •

Alyne Gomes da Vitória Macedo • Maria Clara de Moraes Motta Machado •

Jackline Freitas Brilhante de São José

Utilização de subprodutos do processamento de frutas e hortaliças na elaboração de novos produtos alimentícios	203
---	------------

Rhaiza Marcia Passos Leal • Laura Aparecida Perim da Cruz •

Livia Araújo Silva • Ana Paula Rosa do Amaral • Maira Amaro Pereira •

Jackline Freitas Brilhante de São José

Plantas alimentícias não convencionais: propriedades nutricionais, funcionais, tecnológicas e possíveis aplicações em novos produtos alimentícios	242
--	------------

Daniel Sgrancio Uliana • Rhaiza Marcia Passos Leal •

Kananda Galvão Batestin Messias • Jackline Freitas Brilhante de São José

Inovação em produtos probióticos de origem vegetal: elaboração e perspectivas tecnológicas, sensoriais e funcionais	272
--	------------

Manueli Monciozo Domingos • Alessandra Peres Guimarães •

Daniel Sgrancio Uliana • Beatriz Almeida Balmant •

Jackline Freitas Brilhante de São José

Sorgo em perspectiva: uma abordagem inovadora para a alimentação humana com sustentabilidade	302
---	------------

Guilherme Augusto Loiola Passos • Maria Julia Bernardone Lima •

Aline Lopes • Erica Aguiar Moraes

Desenvolvimento de produtos alimentícios adicionados de insetos comestíveis: inovação e sustentabilidade para a alimentação.....	351
---	------------

Gabriela Luiz Meigre Dias Pereira • Luiza Sant' Anna Ruy •

Érica Aguiar Moraes

Kombucha: aspectos tecnológicos, sensoriais e funcionais..... 380

Gabrielly Cristine Lamão Pontes • Thauan Oliveira Costa •

Paola Zava Lorencini • Karolini Zuqui Nunes • Bárbara Morandi Lepaus •

Daniel Sgrancio Uliana • Jackline Freitas Brilhante de São José

Sobre os autores e as autoras412

Apresentação

A indústria de alimentos está em constante evolução, impulsionada por avanços tecnológicos, mudanças nos hábitos de consumo e a crescente demanda por produtos mais saudáveis, sustentáveis e seguros. No cenário atual, a inovação desempenha um papel fundamental na melhoria dos processos produtivos, na conservação de alimentos e no desenvolvimento de novos ingredientes que atendam às expectativas do mercado e da sociedade.

Este livro, *Inovação no Processamento de Alimentos*, visa apresentar as principais inovações que vêm transformando o setor de alimentos. Ao longo dos capítulos, abordamos novas tecnologias de conservação e processamento, exploramos a utilização de ingredientes alternativos e destacamos as tendências que moldam o futuro da alimentação.

Destinado a estudantes e profissionais da área de alimentos como nutricionistas, engenheiros de alimentos e cientistas de alimentos, este livro foi estruturado para fornecer uma visão abrangente e atualizada do setor. Os leitores encontrarão discussões sobre métodos inovadores de conservação, como tecnologias não-térmicas, além de tópicos sobre o uso de proteínas alternativas, ingredientes funcionais e novas abordagens para formulação de alimentos.

Cada capítulo apresenta uma combinação de fundamentação teórica e aplicações práticas, facilitando a compreensão tanto para

aqueles que estão iniciando seus estudos quanto para profissionais que buscam atualização na área.

A escrita deste livro surgiu da necessidade de reunir, em um único material, as informações relevantes sobre as transformações que ocorrem na indústria de alimentos alinhadas às discussões realizadas no ambiente acadêmico e no desenvolvimento de pesquisas na área de nutrição. Esperamos que esta obra contribua para a formação acadêmica e o aprimoramento profissional de nossos leitores, auxiliando-os a compreender e aplicar as mais recentes inovações no processamento de alimentos.

Boa leitura!

Inovação na área de produção de alimentos

Érica Aguiar Moraes • Jackline Freitas Brilhante de São José

A comissão EAT-Lancet, formada por cientistas de diferentes áreas de atuação e países para traçar metas globais para dietas saudáveis e produção sustentável de alimentos diante da projeção do crescimento populacional, afirma que a produção global de alimentos tem sido relacionada ao aumento da emissão de gases de efeito estufa, a poluição por fertilizantes, a perda da biodiversidade e com mau uso de recursos hídricos e da terra, comprometendo os ecossistemas (WILLETT *et al.*, 2019). Ao mesmo tempo, outra comissão salientou a atual existência da sindemia global, situação em que crises de saúde, desnutrição e obesidade, e a crise ambiental, alterações climáticas, não ocorrem isoladamente, mas se influenciam e se intensificam, reciprocamente, gerando efeitos negativos nas populações, principalmente as mais vulneráveis (SWINBURN *et al.*, 2019).

Nesta perspectiva, as alterações nas condições climáticas agravam a má nutrição, impactando a produção alimentar, dificultando o acesso a alimentos saudáveis e nutritivos, enquanto favorecem a produção de alimentos ultraprocessados de menor valor monetário e, por vezes, menor valor nutricional (SWINBURN *et al.*, 2019).

Ambas as comissões recomendam a necessidade de interconexão entre abordagens políticas, sociais e ambientais para se atingir a produção sustentável de alimentos. Para isso, é necessária adoção de dietas comprometidas com a saúde do planeta, baseada em maior ingestão de frutas, hortaliças, grãos integrais e proteínas de origem vegetal, assim como, exigirá a redução do consumo de produtos de origem animal, principalmente carnes vermelhas, gorduras saturadas, de grãos refinados, de alimentos altamente processados e açúcares adicionados (SWINBURN *et al.*, 2019; WILLETT *et al.*, 2019).

Frente a essas recomendações, a inovação na indústria de alimentos permeia a oferta de alimentos saudáveis e sustentáveis por meio do estímulo as vias alternativas de produção como as rotações de culturas, agricultura orgânica, agrofloresta e agricultura vertical que podem otimizar a produtividade agrícola e a utilização dos recursos (RABADÁN; NIETO; BERNABÉU, 2021; GALANAKIS, 2024). Além da produção alternativa, fomentar o uso de novos ingredientes com avanços em biotecnologia, nanotecnologia associadas à inovação em processos como a impressão 3D, embalagens inteligentes e tecnologias não-térmicas. Associados ao uso de inteligência artificial e digitalização da cadeia de suprimento por meio de tecnologias da Indústria 4.0, permitem a rastreabilidade, redução do desperdício, além da preocupação com a percepção dos consumidores, especialmente em relação à neofobia alimentar (RABADÁN; NIETO; BERNABÉU, 2021; BIGLIARDI; FILIPPELLI, 2022; GALANAKIS, 2024; ŞİMŞEK, *et al.*, 2024; SELVAKUMAR; MANJUNATH, 2025). Juntamente a esse cenário, a formação de novos hábitos alimentares e anseios do consumidor tem pressionado a evolução na produção de alimentos a fim garantir a segurança alimentar mundial (GARCIA *et al.*, 2023).

Diante do exposto, serão apresentadas, neste capítulo, uma visão geral quanto a utilização de produtos à base de plantas, fontes alternativas de proteínas, novos ingredientes, tecnologias emergentes de conservação, uso de embalagens ativas e inteligentes e a

valorização de subprodutos, visando ao desenvolvimento de novos produtos alimentícios.

Produtos à base de plantas

Diante das recomendações mundiais, fontes alternativas às proteínas animais, sejam carnes, sejam peixes, sejam ovos, sejam lácteas, têm sido estudadas devido ao impacto ambiental de produção, bem-estar animal, além de saúde humana e bem-estar associado à nutrição funcional (LIMA *et al.*, 2022). Sob a ótica da instância ambiental os benefícios da substituição das proteínas animais estão relacionados à redução dos recursos hídricos e área de pastagem, emissão de gases de efeito estufa, redução da biodiversidade e do uso de antibióticos na pecuária (HERRMANN *et al.*, 2024; GHIMPEȚEANU *et al.*, 2023; SCOONES, 2023; MACHOVINA; FEELEY; RIPPLE, 2015). Associado a esta, a preocupação com o bem-estar animal é outra razão para a utilização dos alimentos a base de plantas. A redução ou a substituição do consumo de proteínas de fontes animais são vistas como estratégias para redução do uso e do sofrimento animal (DE BOER; AIKING, 2022; RUSSELL *et al.*, 1959). Em relação à saúde humana, embora as carnes sejam importantes fontes de macro (proteínas) e micronutrientes (vitaminas B1, B12, niacina, ferro e zinco) o consumo de carne, especialmente vermelha e processadas, pode aumentar o risco de mortalidade, desenvolvimento de doenças cardiovasculares, diabetes tipo II e alguns tipos de câncer (SINGH, *et al.*, 2025; MARCHESE *et al.*, 2024; AL RAJABI *et al.*, 2022; RICHI *et al.*, 2016; SONG, *et al.*, 2004). Neste sentido, embora a redução do consumo de proteínas animais e aumento das proteínas vegetais apresentem benefícios em diferentes instâncias, há desafios que devem ser superados.

Diante dessa nova necessidade, o mercado tem disponibilizado produtos a base de planta, também denominados *plant-based*. Segundo GARCIA *et al.* (2022), o termo *plant-based* representa alimentos com

características de cor, sabor, textura e aparência semelhantes aos produtos de origem animal. A elaboração desses produtos é realizada pela extração de proteínas oriundas dos cereais e pseudocereais (arroz, aveia e quinoa), leguminosas (soja, ervilha e lentilha), sementes, grãos e nozes (girassol, castanhas, nozes, sementes de abóbora); folhas (beterraba, ora pro nobis, espinafre) ou fontes não convencionais (algas e fungos) adicionados de outros componentes vegetais com óleos e amidos, além de aditivos e coadjuvantes de tecnologia.

O consumo de produtos a base de plantas, além de estar conforme a recomendação mundial para redução do consumo de proteínas animais, contribuem para o aumento do consumo de nutrientes como, por exemplo, as fibras alimentares, minerais, vitaminas e polifenóis, e redução de gorduras saturadas, melhorando a qualidade da dieta (MARCHESE *et al.*, 2024; BRYNGELSSON *et al.*, 2022). Entretanto, embora as opções tradicionais a base de plantas (por exemplo, leguminosas) ofereçam, geralmente, melhores perfis de nutrientes, outras fontes podem levar a uma ingestão abaixo da recomendação de determinados nutrientes, como aminoácidos essenciais, cálcio e ácidos graxos de cadeia longa (MARCHESE *et al.*, 2024). Adicionalmente, esses produtos podem conter fatores antinutricionais, como fitatos e lectinas, que podem afetar a absorção de nutrientes (SCHWEIGGERT-WEISZ *et al.*, 2024; GARCIA *et al.*, 2022; DE ANGELIS, *et al.*, 2021). Embora tecnologias de concentração de proteínas por métodos não químicos, como, o fracionamento a seco, possam concentrar os fatores antinutricionais nos produtos, por outro lado, a aplicação de processamentos térmicos, extrusão termoplástica, fermentação, micro-ondas e alta pressão podem reduzir esses fatores viabilizando o consumo (GARCIA *et al.*, 2022; DE ANGELIS, *et al.*, 2021).

Além do aspecto nutricional, ao mimetizar textura, sabor e cor dos alimentos cárneos tradicionais, a indústria de produtos a base de plantas enfrenta desafios inerentes às propriedades das proteínas vegetais e da expectativa dos consumidores. Ao considerar a textura

dos produtos animais, a diferença da composição (tamanho de molécula, perfil de aminoácidos) e estrutura (miofibrilas) inerentes dos vegetais, resultam em texturas que comprometem, principalmente, a mastigabilidade e suculência, que compreendem características sensoriais desejadas pelos consumidores (SU *et al.*, 2024). Kyriakopoulou, Keppler e Van der Goot (2021) destacam que o uso de proteínas vegetais associado a tecnologias como extrusão, cisalhamento e mistura de proteínas possibilita o desenvolvimento de texturas semelhantes às da carne.

Entre as novas tecnologias, a impressão 3D vem se desenvolvendo para a produção de alimentos a base de plantas, mas que ainda enfrenta desafios. (QIU *et al.*, 2023) avaliaram a mistura de isolado proteico de soja, glúten de trigo e proteína de arroz nas propriedades reológicas de tintas comestíveis. Essa por sua vez, apresentou comportamento pseudoplástico com propriedades viscoelásticas. Os autores afirmaram que essas tintas podem ser úteis no desenvolvimento de alimentos a base de plantas. Neste sentido, a evolução desta tecnologia permitiu a produção de filés de salmão utilizando simuladores de estrutura muscular, composição e macronutrientes, incluindo ácido graxo ômega-3 e físico-química comparáveis ao filé real, sendo que a tecnologia pode ser aplicada para mimetizar outros filés e cortes de carne (TAY *et al.*, 2023).

Associado às novas tecnologias, para outros parâmetros sensoriais como, cor, aroma e sensação oral, ingredientes não proteicos (carragenina, pectina e amido) se fazem necessários para obtenção de produtos com características desejáveis (KYRIAKOPOULOU; KEPPLER; VAN DER GOOT, 2021). Como exemplo, (HAN *et al.*, 2023), ao comparar o uso de polissacarídeos (carragenina, goma de alfarroba, goma arábica, goma gelana, goma guar e goma xantana) em hambúrgueres de ervilha texturizada, demonstraram que adição de 2% de k-carragenina em melhorou a textura, a aparência, além de outros parâmetros físico-químicos do produto. Os autores destacaram

ainda que, textura e aparência são parâmetros sensoriais que influenciam as preferências antes e durante o consumo.

Embora a utilização de plantas possa ser uma alternativa para se alcançar as recomendações mundiais de adequação nutricional e sustentabilidade, ainda são necessárias adequações das fontes, métodos de extração de proteínas, aplicação de tecnologias de processamento e aditivos tecnológicos para que estes produtos possam substituir os produtos de origem animal. Além disso, respeitando-se as questões sensoriais e de segurança de alimentos, é também importante prever a relação custo-benefício para que esta não seja um fator impeditivo ao acesso a estes novos produtos (SU, *et al.*, 2024; SURYAMIHARJA *et al.*, 2024).

Fontes alternativas de proteínas

Conforme apresentado no tópico anterior, oportunizar à população mundial alimentos saudáveis provenientes de um sistema de produção sustentável é uma demanda emergente, sendo a exploração de substitutos às proteínas de origem animal largamente discutidos na ciência, tecnologia e indústria de alimentos (WILLETT *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2022). Neste sentido, (GROSSMANN; WEISS, 2021) propõe uma definição para o termo “proteínas alternativas”, sendo estas produzidas por fontes com baixo impacto ambiental para substituir fontes de proteína estabelecidas, podendo ser obtidas por meio de criação de animais desde que respeitem o bem-estar animal. Assim, entre as atuais alternativas estão as plantas, discutidas anteriormente, e os fungos, as algas, os insetos e as carnes cultivadas.

Diferentemente às proteínas animais e vegetais, que requerem terras cultiváveis e recurso hídrico, os fungos exigem apenas resíduos baratos como fonte de carbono e energia, além de mínimos recursos ambientais, como, água e luz, para a produção de biomassa e concentração de proteínas (AMARA; EL-BAKY, 2023; DERBYSHIRE,

et al., 2023). Tradicionalmente, os fungos são largamente utilizados na produção de alimentos fermentados e bebidas como *missô*, *kefir* e *tempeh* (QIU et al., 2022; REKDAL et al., 2023; AMARA; EL-BAKY, 2023; TAMANG; WATANABE; HOLZAPFEL, 2016). Entretanto, há atualmente a incorporação de fungos como fontes de proteína em vários alimentos, incluindo panificado, queijo, cerveja, condimentos e produtos cárneos vegetarianos (LI et al., 2023). Nutricionalmente, (YU, et al., 2020) avaliaram 23 fungos comestíveis e verificaram que as fibras alimentares (14,4 ~ 70,2 g/100 g), seguidas do teor de proteínas (8,5 ~ 36,9 g/100 g) foram os nutrientes que se apresentaram em maiores quantidades. No supracitado estudo, a espécie *Volvariella volvacea* (Bull.:Fr.) Sing. se destacou quanto ao maior teor de proteínas, carboidratos e cinzas. Neste sentido, todos os tipos de fungos avaliados foram considerados ricos em proteínas e com baixo teor de lipídios. Corroborando este estudo, (DIMOPOULOU et al., 2022) ao avaliar o valor nutricional de 16 cogumelos demonstraram que fungos são excelentes fonte de proteínas (13,8 ~ 38,5 g/100 g), fibras alimentares (2,9 ~ 14,9 g/100 g), além de fornecer de 15 a 30% da recomendação diária de vitaminas e minerais. Ademais, (ERBIAI et al., 2021), ao comparar duas espécies de cogumelos (*Armillaria mellea* e *Macrolepiota procera*), de diferentes países, além do perfil nutricional anteriormente citado, demonstraram que os fungos apresentam ainda capacidade antioxidante devido à presença de compostos bioativos.

Outro achado relevante foi observado por (STOFFEL et al., 2021), no qual a farinha de trigo foi substituída (25 – 100%) por micoproteína de *Pleurotus albidus* em biscoitos de chocolate. Tal substituição aumentou o teor de proteínas (67%), fibras alimentares (336%), fenólicos totais (81%), capacidade antioxidante (159%) e inibiu a atividade *in vitro* de α -glycosidase (75%), melhorando a qualidade nutricional e bioativa da preparação. Adicionalmente, a micoproteína aumentou a dureza e alterou a cor dos biscoitos (STOFFEL

et al., 2021). Por vezes, características tecnológicas podem ser melhoradas com a aplicação de processamentos ou mesmo com a junção de outros ingredientes.

A associação de proteínas de fungos às proteínas vegetais tem sido estudada como alternativa para que os produtos análogos de carne ofereçam melhor aporte proteico, e semelhança em textura e aparência. Como exemplo, a incorporação, até 30%, de micélio (*Pleurotus eryngii*) em proteínas de ervilha para a elaboração de produtos análogos à carne, aumentou índice de solubilidade em água, capacidade de absorção de água e de óleo, capacidade de retenção de água e o volume de expansão do produto, melhorando a microestrutura e estrutura secundária de proteínas, que resultou em um produto análogo de carne fibroso de baixa umidade (MANDLIYA *et al.*, 2022).

Apesar do interesse em utilizar os fungos como fontes proteicas, as percepções do consumidor, a falta de familiaridade, preocupações com os atributos sensoriais como sabor e textura se configuram como desafios para a utilização como fonte alimentar (LI *et al.*, 2023; CHEZAN; FLANNERY; PATEL, 2022). As sugestões para romper com esses desafios estão relacionadas à familiaridade e educação, aos benefícios nutricionais, e ao desenvolvimento de produtos inovadores que apresentem melhores atributos sensoriais (LI *et al.*, 2023; CHEZAN; FLANNERY; PATEL, 2022).

As algas marinhas também se destacam na busca pela sustentabilidade devido à vantagem de crescerem e se reproduzirem com recursos mínimos, em vastos e inexploradas áreas oceânicas que podem ser uma alternativa à escassez de terras agrícolas comparadas às fontes de proteínas tradicionais (PEREIRA; COTAS; GONÇALVES, 2024; CHEN, *et al.*, 2024). As algas marinhas têm sido consideradas como uma importante fonte de proteínas, com aminoácidos essenciais, fibras, vitaminas e minerais (MANDALKA, *et al.*, 2022; PEREIRA; COTAS; GONÇALVES, 2024). Um estudo realizado na costa brasileira, com 12 espécies de algas marinhas, demonstrou variação no teor dos nutrientes, destacando, nas espécies *Spatoglossum schroederi* e

Alsidium seaforthii, o teor de proteínas foi de, aproximadamente, 20%. Os autores destacam que as algas marinhas lançadas na praia são adequadas para fins nutricionais e outros fins bioeconômicos, mas que estudos relacionados à micro poluição deve ser considerados.

A incorporação de algas em produtos alimentícios e seus impactos nutricionais e tecnológicos vêm sendo discutidos na literatura científica (QAZI *et al.*, 202; KHEMIRI, *et al.*, 2021; ÖZLÜ, BÖLEK, 2024). Exemplificando, a substituição de 12% de farinha de trigo por alga marinha, *Tetraselmis chuii*, aumentou o teor proteico dos pães, no entanto, afetou negativamente a estrutura reológica da massa. Porém, o tratamento da alga com etanol melhorou não apenas a característica reológica, como a coloração do produto. Segundo os autores, pigmentos e a presença de compostos voláteis pode ser um desafio para a incorporação de algas a produtos alimentícios (QAZI *et al.*, 2021).

Por outro lado, o enriquecimento de massas de cuscuz com 6% de biomassa de algas (*Chlorella vulgaris*) melhorou o valor nutricional da preparação, aumentou especialmente o teor de proteínas e cinzas e reduziu o teor de carboidratos. Todas as preparações forneciam ao menos 12% do valor energético do alimento provenientes das proteínas, além de terem apresentado maior digestibilidade *in vitro* em relação ao controle. Estes resultados tornam as preparações elegíveis para utilização de alegações quanto a esse nutriente, de acordo com regulamentações específicas. Adicionalmente, o enriquecimento por algas, por um lado, diminuiu a firmeza das preparações, e por outro, melhorou as funções viscoelásticas e a qualidade do cozimento, além de poder, competir sensorialmente com o produto convencional (KHEMIRI, *et al.*, 2021).

Adicionalmente, Özlü e Bölek (2024) consideraram as algas da espécie *Neopyroia yezoensis* como um promissor ingrediente funcional para alimentos. Estes autores demonstraram que a adição de até 1,5% de pó de *Neopyroia yezoensis* em *kefir* vegano de extrato de aveia aumentou o teor de proteínas, lipídios, cinzas, o teor de composto fenólicos e capacidade antioxidante. Tecnicamente, a alga

aumentou a viscosidade, enquanto reduziu o pH do produto e causou alterações na coloração. Destacando ainda que, até o nível de 1%, a alga pode ser adicionada sem prejuízo nas propriedades sensoriais do produto, mas que técnicas como o encapsulamento de algas poderiam auxiliar no aumento da aceitação pelos consumidores.

A terceira possibilidade de fontes proteicas sustentáveis apresentadas nesta seção são as carnes cultivadas (CHODKOWSKA; WÓDZ; WOJCIECHOWSKI, 2022). Também conhecida como carne celular ou carne limpa, é definida como uma carne autêntica, obtida por meio de métodos biotecnológicos, a partir de células animais musculares, de gordura e tecido conjuntivo derivadas de linhas celulares de aves, mamíferos ou peixes (SPECHT *et al.*, 2018). O preço, a textura e as demais propriedades sensoriais das carnes reais são o principal objetivo da indústria de carne cultivada. Associada a este objetivo, está a preocupação com a produção ecologicamente correta (redução da pegada de carbono), redução do sofrimento animal, evitando o confinamento, abate e o uso aditivos usados na criação (CHODKOWSKA; WÓDZ; WOJCIECHOWSKI, 2022). Embora as carnes cultivadas possam abrandar preocupações éticas e ambientais, esta alternativa às fontes proteicas também afastam a produção de carne das práticas tradicionais, abrindo caminhos para questões relacionadas à soberania alimentar e identidade (UMBRELLO, 2024).

Nutricionalmente, as carnes tradicionais são reconhecidas por possuírem proteínas de alta qualidade devido à presença de aminoácidos essenciais. Como derivadas de células animais, é esperado que as carnes cultivadas contenham qualidade semelhante. Entretanto, a composição dos meios de cultura será responsável pela definição do perfil proteico, assim como a quantidade e qualidade das vitaminas e minerais, representando um desafio para o cultivo das carnes (Fraeye *et al.*, 2020; SEO *et al.*, 2023; TIMONEDA; AMIR-VARESI; OVISSIPOUR, 2024; CHOTELERSAK *et al.*, 2025). Neste sentido, algumas das preocupações quanto à possibilidade de a carne cultivada não conter os nutrientes nas proporções encontradas nas

carnes convencionais, ou sofrerem alterações na digestão a absorção dos nutrientes, mas que, por outro lado, possam possuir compostos bioativos que contribuem para o sabor e valor nutricional (CHOTELERSAK *et al.*, 2025).

A modulação da composição das carnes cultivadas é um dos possíveis benefícios desse processamento. Assim, a modulação do conteúdo muscular e de gordura, permite, por exemplo, a deposição de gordura intramuscular personalizada, que além de atenderem a demanda nutricional ajustada, podem aprimorar o sabor e textura do produto. No estudo conduzido por Ma *et al.* (2024), foi demonstrada a transdiferenciação miogênica/lipogênica de fibroblastos de frango em 3D, resultando na produção de massa muscular e no depósito de gordura nas mesmas células, sem a co-cultura ou mistura de diferentes células, ou substâncias gordurosas. Além disso, o nível de triglicerídeos foi controlado para se assemelhar à carne de frango tradicional. Os autores destacam que o estudo abre novas alternativas para a produção de carne cultivada adaptada à demanda dos consumidores. Da mesma forma, nutrientes específicos, como, ácidos graxos ômega-3 ou vitaminas, podem ser projetados para a produção de alimentos com características funcionais (REGLERO *et al.*, 2008; CHOTELERSAK *et al.*, 2024).

Embora a carne cultivada seja uma potencial fonte de proteína sustentável, a sua popularização enfrenta desafios. Um deles, é a produção em larga escala, uma vez que reduzir os custos da produção é essencial para a comercialização e aprovação regulatória do produto. Além disso, questões sensoriais como sabor e textura, para que se aproximem da carne convencional ainda precisam ser mais bem estabelecidas, associada ainda que a aceitação é um fator crítico que deve ser trabalhado na população, principalmente quanto aos benefícios do consumo. Neste cenário, é importante o estabelecimento de estratégias, como, por exemplo, o desenvolvimento de carnes híbridas, a partir da combinação de carnes cultivadas e proteínas animais, e o estabelecimento de métodos de cultivo

mais eficientes para alcançar o potencial de exploração do produto (KIRSCH; MORALES-DALMAU; LAVRENTIEVA, 2023; PEKER *et al.*, 2024; CHOTELERSAK *et al.*, 2025).

As proteínas provenientes de insetos correspondem também a uma alternativa sustentável às fontes tradicionais, por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa, menor uso da terra e da água e a capacidade de converter resíduos orgânicos em proteínas de alta qualidade. Embora ricos em proteínas completas e micronutrientes essenciais, a disseminação na alimentação humana a aceitação, devido à falta de familiaridade ou repulsa, constitui uma barreira a sua utilização (LANGE; NAKAMURA, 2021). Uma abordagem aprofundada sobre o consumo de insetos está apresentada em um dos capítulos deste livro.

Substitutos de ingredientes críticos (sódio, açúcar adicionado e gordura trans)

A busca por substitutos eficazes para nutrientes críticos, como sódio, açúcar adicionado e gorduras trans, vem ganhando espaço na indústria de alimentos, impulsionada por preocupações com a saúde, o ambiente e pressões regulatórias (WINBURN *et al.*, 2019; WILLETT *et al.*, 2019; BRASIL, 2020a; BRASIL, 2022). A exemplo, a rotulagem de alimentos brasileira atualizou suas orientações para alimentos embalados, as quais propôs a rotulagem frontal, em formato de lupa, para alimentos que extrapolam os teores dos ingredientes críticos (sódio, açúcar adicionado e gordura trans) conforme a Instrução Normativa – IN nº 75, de 8 de outubro de 2020 (BRASIL, 2020b). Este alerta deve estar localizado na metade superior do painel principal com as expressões “ALTO EM AÇÚCAR ADICIONADO”, “ALTO EM GORDURA SATURADA” OU “ALTO EM SÓDIO”, de acordo com as características do produto, podendo haver combinação entre elas (BRASIL, 2020b).

Entretanto, esses ingredientes exercem funções tecnológicas como, realce de sabor, textura e controle microbiológico. Assim, a substituição total ou parcial desses ingredientes torna-se um desafio para a indústria de alimentos (SUNA; ÇOPUR, 2018; GARCIA *et al*, 2023). Neste sentido Suna, Çopur (2018) conceituam os substitutos de alimentos como alternativos de um constituinte presente no produto por uma alternativa que mantém as características do mesmo, para garantir as semelhanças organoléptica, microbiana ou funcional e melhoram o valor nutricional. Ingredientes alternativos que, além de manterem as qualidades sensoriais dos alimentos, promovem padrões alimentares mais saudáveis estão disponíveis no mercado.

Redução de sódio

Atualmente a recomendação de ingestão diária, que objetiva minimizar os riscos de doenças cardiovasculares, como a hipertensão arterial e o acidente vascular cerebral, é de 2 g de sódio, que correspondem a 5 g de cloreto de sódio (WHO, 2012). Apesar dessa recomendação, World Health Organization (WHO) e a Organização-Pan Americana de Saúde (OPAS) propuseram a redução de 30% do consumo de sódio atual (OPAS, 2021). No Brasil, segundo dados do Vigitel (2023), cerca de 27,9% da população brasileira adulta recebeu diagnóstico de hipertensão arterial (BRASIL, 2023).

Diante deste cenário, o cloreto de sódio (NaCl), principal fonte de sódio na alimentação humana, continua a ser largamente utilizado por desempenhar funções essenciais nos alimentos, que afetam desde o sabor, a textura e a conservação do alimento. De maneira geral, o cloreto de sódio age como intensificador de sabores, fornecendo o sabor salgado característico e aprimora a percepção de outros sabores fundamental para experiência sensorial e satisfação do consumidor (DOS SANTOS *et al*, 2023; SOOD; METHVEN; CHENG, 2024). Assim, entre as estratégias para redução do uso de NaCl estão: a) redução sem compensação por meio de outros substitutos; b) a

substituição parcial ou total por outros sais cloratos, ou lactatos; c) incorporação de realçadores de sabores; d) aplicação de novas tecnologias de conservação (ROSA; MARTINS; DALA-PAULA, 2022).

Caso de redução sem compensação por outros substitutos foi demonstrado em biscoitos doces por Ayed *et al.* (2021). Os autores propuseram a redução do NaCl em níveis de 33%, 67% e 100%, sendo que o menor nível de redução (0,86 g/100 g) foi capaz de apresentar efeitos negativos de sabor e textura. Esses resultados foram explicados pela partição de compostos aromáticos hidrofóbicos no espaço livre, impactando na estrutura, com maiores e mais numerosas células de ar. Os autores destacam que o “sal oculto”, responsável por características funcionais e tecnológicas na preparação, é negligenciado em estratégias de redução de sódio.

Chen *et al.* (2019) avaliaram a substituição parcial de NaCl nas características físicas, microbianas e sensoriais de salsicha seca Harbin. As substituições corresponderam a 70% NaCl com 30% cloreto de potássio (KCl) ou 70% NaCl; 20% KCl combinados com 3,5% maltodextrina, 4% L-Lisina, 1% L-Ala, 0,5% ácido cítrico e 1% Ca-lactato. Foi demonstrado que apenas a substituição de NaCl associado ao KCl, foi capaz de apresentar maior teor de umidade, atividade de água, menor pH, atividade microbiana, dureza e mastigabilidade que resultaram em melhor aceitação sensorial. Os autores destacaram que os aminoácidos utilizados poderiam agir como intensificadores de sabor, e mascarar o amargor do potássio.

Diferentes estratégias para redução do sódio são frequentemente associadas, a exemplo, da substituição parcial de NaCl por KCl e da adição de intensificadores de sabor (arginina, extrato de levedura e extrato de orégano) no processamento do queijo prato probiótico (SILVA *et al.*, 2017). As combinações permitiram a sobrevivência das bactérias lácticas e probióticas, entretanto, alteraram a composição centesimal, capacidade antioxidante e atividade inibitória da enzima conversora de angiotensina I, além de parâmetros reológicos. Porém, os extratos de levedura e orégano obtiveram bom desempenho no

teste do consumidor, podendo ser utilizados como alternativas tecnológicas para minimizar o sabor metálico proveniente do cloreto de potássio (SILVA *et al.*, 2017).

Por outro lado, o uso de intensificadores de sabor (Glutamato Monossódico, Inosinato Dissódico, Inosinato Dissódico + Guanilato Dissódico, Aroma Kokumi Aji-100® (AJI-NO-MOTO®)) e bloqueador de amargor (lisina) na redução de 50% no teor de sódio (NaCl e KCl) em molho de tomate, embora tenha promovido a equivalência salgada, os intensificadores mascaram apenas inicialmente o sabor amargo do cloreto de potássio, enquanto o uso de lisina não foi eficaz (FILHO *et al.*, 2020). Desta forma, a combinação de cloreto de potássio e glutamato monossódico foi mais eficiente na substituição do sódio, devido à sua maior similaridade na percepção sensorial ao NaCl. Neste sentido, a particularidade de cada produto e de cada estratégia de redução do sódio devem ser analisadas criticamente, considerando a percepção do consumidor.

Os efeitos do processamento de alta pressão (200 MPa, 10 min) na qualidade sensorial de salsichas de frango com redução de sódio foram estudados por Zhou *et al.* (2021). A redução de 25% do sódio das preparações foi realizada por meio de mistura de NaCl com três sais de potássio distintos (cloreto de potássio, lactato de potássio e citrato de potássio). Os resultados destacaram que o sal de potássio não alterou os parâmetros sensoriais e o processamento de alta pressão melhorou a textura das salsichas, entretanto, o processamento em combinação com K-lactato ou K-citrato reduziu a salinidade percebida das salsichas. Assim, os sais de potássio podem ser utilizados como estratégia para redução de sódio em produtos cárneos, mantendo as propriedades sensoriais.

Outra tecnologia que tem sido estudada quanto a redução de sódio é o uso com campo elétrico pulsado, sugerido, por exemplo, para produtos cárneos mais saudáveis. O método foi eficaz ao melhorar a salinidade ao influenciar a difusão do sal (NaCl), reduzido em 40%, e a entrega do sódio que permitiram uma melhor percepção

durante a mastigação. O campo elétrico pulsado também não alterou a cor, o rendimento nem a estabilidade oxidativa e microbiana de carnes desidratadas. Além da redução de sódio, os provadores preferiram a carne desidratada por meio do uso do meio do método ao ser comparado com aquela que teve apenas o teor de sal reduzido (BHAT *et al.*, 2020).

Adicionalmente, Haridasan *et al.* (2025) utilizaram um modelo estatístico, Box-Behnken, para analisar o efeito de diferentes níveis de gordura, sal e pressão manométrica durante a mistura de massas de pizza. Os autores destacam que reduções direcionadas nos níveis de gordura e sal podem manter as propriedades desejáveis da massa e o desempenho de panificação. O estudo determinou que o teor de gordura ao nível de 111 g e 15,75 g de sal foram capazes de manter a plasticidade e a resistência da massa. Neste aspecto, ressaltam a importância do equilíbrio dos ingredientes e condições de preparo que, para além de desenvolverem produtos tecnologicamente adequados, são focados na saúde do consumidor.

Redução de açúcar adicionado

Atribuir doçura aos alimentos é uma das principais funções dos açúcares. Entretanto, melhorar a qualidade global, textura, coloração e até mesmo o prazo de validade por desempenhar papel na segurança alimentar e estabilidade dos produtos são também contribuições desse ingrediente (GOLDFEIN; SLAVIN, 2015). Entretanto, o consumo excessivo de alimentos contendo açúcar naturalmente ou adicionado é, reconhecidamente, um fator de risco para o desenvolvimento de sobrepeso, obesidade, diabetes, entre outros agravos à saúde (ENDY, *et al.*, 2024; LARA-CASTOR, *et al.*, 2025). Assim, desde 2015, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que a ingestão de açúcar, para indivíduos de todas as idades, seja menor que 10% do total de calorias ingeridas por dia, sugerindo que a redução para 5% seja capaz de trazer maiores benefícios à saúde (WHO, 2015). De

acordo com Steele *et al.* (2016), 82,1% dos americanos excederam o limite recomendado de 10% de energia proveniente de açúcares adicionados. No Brasil, a Pesquisa do Orçamento Familiar 2017-2018 demonstrou que o consumo médio diário de açúcar de adição, representados por açúcar de mesa e o adicionado a preparações e alimentos processados e ultraprocessados, aumentou em relação aos períodos anteriores, em todos os grupos etários e em ambos os sexos (IBGE, 2020). Deste modo, em 2023, a prevalência de diabetes foi de 10,2%, enquanto a de sobrepeso e obesidade foi de 61,4% e 24,3%, respectivamente (BRASIL, 2023).

Diante do desafio de equilibrar a manutenção das funções tecnológicas dos açúcares e a produção de alimentos processados de melhor qualidade, é fundamental adotar estratégias em diversas áreas para minimizar os riscos associados ao consumo excessivo. Russell *et al.* (2021), para além da reformulação dos produtos, apontam as principais estratégias políticas para a redução do uso de açúcares, seriam elas: a) taxação de produtos açucarados; b) intervenções ambientais como, por exemplo, redução da disponibilidade de alimentos açucarados em escolas ou disponibilização de alimento saudáveis (frutas); c) intervenções educacionais como, por exemplo, campanhas em mídias, educação comunitária com alerta sobre os malefícios do consumo excessivo de açúcar adicionado; d) rotulagem de nutrientes críticos com a rotulagem frontal. Por outro lado, Mckenzie e Lee (2022) complementam com estratégias a serem aplicadas pela indústria de alimentos a) redução de açúcar; b) substituição do açúcar; c) modificações físicas; d) modificações de *flavor*; e, e) modificações da formulação.

A redução do açúcar em produtos alimentícios é, muitas vezes, possível sem afetar negativamente suas características sensoriais. A exemplo dessa redução, o açúcar adicionado de bebida láctea sabor chocolate com probióticos uma redução de 20% modificou a intensidade da doçura percebido por avaliadores treinados quanto por consumidores. Entretanto, a redução de até 40% não afetou

significativamente o sabor percebido por consumidores em um mercado. Os autores ressaltam que o uso excessivo de açúcar adicionado pode ser reduzido em impactos relevantes nas respostas sensoriais (OLIVEIRA, 2015).

A redução da sacarose foi avaliada por meio da substituição por bagaço de maçã, permeado de soro do leite, oligofrutose, polidextrose em bolo (MILNER *et al.*, 2020). Os pesquisadores obtiveram redução da sacarose entre 21% e 27% e demonstraram que em todas as preparações houve aumento da atividade de água, manutenção das células do miolo e as formulações eram aceitáveis para os painelistas. Entretanto, o bolo com bagaço apresentou menor volume específico e a maior firmeza do miolo, enquanto, as substituições com oligofrutose, permeado de soro e polidextrose aumentaram a umidade.

Outra proposta foi o uso de xarope de *syrup* à base de dextrina de milho e casca de grão de bico na formulação de recheio de frutas com teor reduzido de açúcar (30, 50 e 70%). O aumento da concentração do xarope resultou em maior firmeza, adesividade, coeficiente de consistência, estabilidade de cozimento e diferenças de cor. Entretanto, o recheio com a redução de 30% do açúcar foi apreciado semelhantemente ao controle por consumidores, confirmando a funcionalidade tecnológica do xarope em reduzir o açúcar, além de possibilitar uso de alegações como “redução de açúcar” e “alto teor de fibras” no produto (CARCELLI, *et al.*, 2022).

As modificações físicas embora incomuns podem auxiliar na elaboração de produtos com teor reduzido de açúcar, conforme demonstrado por Kistler *et al.* (2021) em produtos de confeitaria. Por meio da técnica de camadas em formatos de cubos, utilizando impressora 3D, houve aumento de 33% na intensidade da doçura, devido à diferença de concentração de sacarose, entre a casca externa e o interior, em relação ao controle com sacarose homogênea. Assim, a primeira camada de contato mais doce aumentou a percepção de doçura geral, indicando a funcionalidade da modulação da doçura pela distribuição não homogênea da sacarose.

Adicionalmente, a modulação do tamanho das partículas de sacarose modificou as propriedades físicas e sensoriais dos *brownies* de chocolate, a qual as preparações elaboradas com as menores dimensões foram percebidas como mais doces, macias, úmidas e escuras. Neste sentido, a modulação das partículas pode ser usada como uma alternativa à redução do açúcar em alimentos (RICHARDSON *et al.*, 2018).

A substituição de açúcares por adoçantes pode gerar sabores indesejáveis nos alimentos. Neste sentido, a utilização de aromatizantes pode ser uma estratégia na redução de açúcares. Bertelsen *et al.* (2021) investigaram a associação entre adoçante e sacarose com e sem aroma de baunilha. Os resultados indicaram o maior efeito *cross-modal* do aroma de baunilha na intensidade da doçura dos adoçantes mais perceptualmente semelhantes à sacarose, sugerindo o uso do aromatizante como alternativa à redução de açúcar.

Por outro lado, Oliveira *et al.* (2015), ao associarem aroma de baunilha e adoçante natural taumatina, demonstraram que o aromatizante não foi eficiente em aumentar a percepção de doçura em bebidas lácteas com sabor de chocolate com a menor porcentagem de redução de açúcar, além de a taumatina não ter influenciado na percepção de doçura quando adicionada em uma concentração de até 10 ppm em produtos com baixa redução de açúcar. Assim, os autores argumentam que o aromatizante não foi viável para esta categoria de produto.

A reformulação de produtos, principalmente com a adição de ingredientes funcionais que agregam fibras ou antioxidantes, também é uma estratégia para redução de açúcares. Dentro dessa proposta, a utilização de frutas pode auxiliar no sabor doce e contribuir para um produto mais saudável. A substituição do açúcar por purê de maçã em bolos reduziu o valor calórico total, teor de lipídios e carboidratos e aumentou a fibra alimentar. Embora as preparações tenham sido bem aceitas pelos provadores, houve alteração na cor, sabor e textura (STAVALE; ASSUNÇÃO BOTELHO; ZANDONADI, 2019).

Adicionalmente, a reformulação com uso de enzimas e atividade microbiana também foram utilizadas na elaboração de pães doce como

estratégia de redução do teor de açúcar. Müller *et al.* (2021) propuseram a utilização da isomalto-oligossacarídeos como agente adoçante em massa, hidrolases de polissacarídeos para gerar açúcares a partir de polissacarídeos de farinha e da fermentação natural. Entre as formulações testadas os autores verificaram que a utilização de 4,5% de isomalto-oligossacarídeos em combinação com fermento natural de *Weissella cibaria*, amiloglucosidase e a frutosidase FruA permitiu a produção de pão com 50% de redução na adição de sacarose, mantendo a intensidade do sabor doce. É necessário destacar que o desenvolvimento de novos produtos, principalmente aqueles que apresentam inovação, requerem pesquisas para melhor adequar as alternativas existentes às características desejáveis do produto e consumidores.

Redução de gorduras trans

A Organização Mundial da Saúde sugere que a ingestão de gorduras saturadas seja reduzida a menos de 10% da ingestão calórica total e das gorduras trans, a menos de 1% (WHO, 2023). Essa orientação é oriunda da relação entre o consumo desses tipos de gorduras com o desenvolvimento, principalmente, de doenças cardiovasculares com aumento da hipertensão arterial entre outros agravos (MICHÁ; MOZAFFARIAN, 2008; LUAN, *et al.*, 2024). Neste sentido é importante destacar que a ingestão de ácido graxos trans corresponde a 5% proveniente de gorduras naturalmente presente nos alimentos (carnes e leites), enquanto das gorduras processadas industrialmente podem atingir até 60% da ingestão e contribuir para o aumento dos triglicerídeos séricos, do colesterol total e o LDL, e diminuição do colesterol HDL (DAWCZYNSKI; LORKOWSKI, 2016).

No Brasil, o consumo de cinco ou mais grupos de alimentos ultraprocessados foi de 20,2 a 26,6%, na população entre 18 e 44 anos, segundo dados do estudo Vigitel (BRASIL, 2023). Diante deste cenário, entrou em vigor, no Brasil, a Resolução da Diretoria Colegiada nº 632 de 24 março de 2022, que dispôs sobre a restrição de uso de

gorduras trans industriais em alimentos, proibindo a produção, a importação, o uso e a oferta de óleos e gorduras parcialmente hidrogenados para uso em alimentos e de alimentos formulados com estes ingredientes; e limitando quantidade de gorduras trans industriais em 2 gramas por 100 gramas de gordura total nos alimentos destinados ao consumidor final e nos alimentos destinados aos serviços de alimentação (BRASIL, 2022).

Entretanto, a utilização deste tipo de gordura nos produtos alimentícios oferece vantagens tecnológicas por meio da estabilidade oxidativa, por melhora dos atributos sensoriais, aumentam brilho, crocância, maleabilidade e espalhabilidade de massa, contribuem para retenção de ar e volume de produtos (KODALI, 2014). De face para a funcionalidade dos ácidos graxos trans e a demanda por produtos mais saudáveis, a substituição dessa gordura por alternativas que mantenham as características desejáveis dos produtos é um desafio para a indústria de alimentos. Nagpal *et al.* (2021) enumeram em sua revisão algumas classes de substitutos para este ingrediente, a saber: a) aprimoramento de óleos; b) hidrogenação; c) combinações de óleos; d) fracionamento de óleos; e) interesterificação; d) oleogéis

A primeira alternativa se refere ao melhoramento genético de plantas fontes de óleos que, por meio da biotecnologia, produzem óleos com menor teor de gordura trans. Na indústria de alimentos, o óleo de soja é utilizado tradicionalmente para a produção de margarina. Para a obtenção da consistência sólida a temperatura ambiente, é necessário que o óleo seja submetido a reação de hidrogenação parcial para obtenção de ácidos graxos insaturados, no qual uma parte desses são os ácidos graxos trans (MSANNE; KIM; CAHOON, 2010). Entretanto, com a aplicação da biotecnologia foi possível produzir óleo de soja que dispensa o processo de hidrogenação parcial ou mistura com óleo de palma (fonte de ácidos graxos saturados) (VOGEL *et al.*, 2019). A inserção de genes específicos nas plantas de soja aumentou os teores do ácido graxo palmítico em duas vezes, sendo o conteúdo total de ácido graxo saturado (ácido palmítico + ácido esteárico) do

óleo foi de aproximadamente 30%. Apesar do óleo ter perdido grande parte da consistência sólida ao modificar a temperatura de 10 °C para 30 °C, foi constatada potencial aplicação para desenvolvimento de produtos isentos de gordura trans (VOGEL *et al.*, 2019).

Embora a hidrogenação seja um método tradicional de obtenção de gorduras sólidas a partir de óleos, este ainda pode ser utilizado como método para obtenção de gorduras com teores reduzidos de gorduras trans por meio do controle de condições como o uso de catalisadores, tempo e pressão (ZHAO *et al.*, 2018; NAGPAL *et al.*, 2021). A hidrogenação eletrocatalítica e a hidrogenação em estado fluido supercrítico foram utilizadas para reduzir o teor de ácidos graxos trans em óleo de soja. Foi demonstrado que a adição de um promotor de metal precioso melhorou a dispersão do catalisador e reduziu a formação de ácido graxos trans para 10,43%, enquanto o ácido oleico foi de 50,27%. Este resultado foi obtido por meio do uso do catalisador Cu-Ag/SBA15 no início da reação, seguido do Ni-Ag/SBA15 após a separação do catalisador anterior (ZHAO *et al.*, 2018). Desta forma a otimização do processo de hidrogenação pode contribuir para a elaboração de produtos mais saudáveis.

As misturas de óleos com diferentes composições de ácidos graxos podem contribuir para a manutenção das propriedades tecnológicas, enquanto reduzem o teor dos ácidos graxos trans (BIHOLA *et al.*, 2025). Um exemplo desta proposta foi a combinação de óleo de soja, óleo de palmiste totalmente hidrogenado e óleo de soja totalmente hidrogenado (45/45/10, p/p/p) (ZHEN *et al.*, 2025). Essa mistura apresentou curva de teor de gordura sólida, comportamento de cristalização, padrão de nucleação, modo de crescimento, viscosidade e perfil de sabor semelhante ao óleo parcialmente hidrogenado. Além disso, ácidos graxos trans não foram detectados nos óleos base e nas misturas avaliadas.

Outros métodos de processamentos de óleos são o fracionamento e a interesterificação. Enquanto o fracionamento visa separar óleo e gorduras a partir da utilização da propriedade física de ponto de

fusão, cristalização e subsequente filtragem, a interesterificação altera a posição de um ácido graxo na estrutura do triacilglicerol sem alterar a composição e o perfil de ácidos graxos das gorduras ou óleos (NAGPAL *et al.*, 2021). Fukami *et al.* (2025) utilizaram os processos de interesterificação associado ao fracionamento para obtenção de substitutos de manteiga de cacau livres de gorduras trans à base de óleo de palma. Diferentes proporções de óleo de palma, óleo de palma hidrogenado e óleo de palmiste foram submetidos a uma interesterificação química em um reator de vidro, utilizando metóxido de sódio como catalisador e ácido cítrico para neutralização, a 80 °C por 30 minutos. Após isto, as gorduras foram fracionadas utilizando hexano e acetona para separar frações com diferentes etapas de resfriamento e filtragem. As gorduras testadas derreteram a 38 – 39 °C, mas, houve floração de gordura apenas no teste sem óleo de palmiste. Os autores afirmam que estes processos são fundamentais para atingir as propriedades desejadas das gorduras frequentemente usadas na indústria alimentícia e de oleaginosas.

Por fim, os oleogéis são outra abordagem para redução das gorduras trans. Estes são obtidos por um método de estruturação de lipídios geralmente ricos em ácidos graxos insaturados, que adquirem uma textura semissólida quando presos em uma rede cristalina tridimensional formada por um agente estruturante (oleogelificante) em uma concentração específica (SILVA *et al.*, 2023). Com o propósito de utilizar substituto de gorduras saturadas e trans, os autores Giacomozzi, Carrín, Palla (2018) otimizaram o preparo de oleogéis a partir de óleo de girassol com alto teor de ácido oleico e monoglicerídeos em *muffins*. A partir de modelo matemático para obtenção das propriedades desejadas, prepararam o oleogel utilizando as proporções propostas de óleo de girassol previamente aquecido a 80 °C em banho-maria. A mistura foi mantida sob agitação magnética por 30 min e acondicionada em recipientes retangulares de polietileno, permitindo a formação do gel por resfriamento. Neste estudo foi demonstrado que a substituição de margarina por oleogéis aumentou

a maior espalhabilidade, volume específico, dureza semelhante e uma estrutura de miolo mais conectada e homogênea. Neste sentido, além da substituição, ter apresentado resultados tecnológicos desejáveis, ainda melhorou o perfil nutricional do produto.

Utilização de tecnologias emergentes para conservação dos alimentos

O processamento de alimentos consiste na transformação de ingredientes crus ou cozidos, por meios físicos ou químicos, em outros produtos alimentícios comercializáveis, seguros e/ou atrativos para serem consumidos, visando sempre prolongar sua vida útil ou aprimorar sua qualidade. Deve-se destacar que o principal objetivo do processamento de alimentos é sua conservação e, atualmente, se sabe que características sensoriais podem ser melhoradas por meio da aplicação de diferentes métodos de conservação (ALEXANDRE *et al.*, 2019).

O desenvolvimento de métodos de conservação de alimentos foi essencial para garantir o desenvolvimento da sociedade moderna. Nos últimos anos, percebe-se um aumento da demanda dos consumidores por alimentos com sabor e cor mais próximos do natural, mas que possuam ao mesmo tempo, uma vida de prateleira extensa. Isso pode ser obtido por meio de métodos de processamento mínimo que conservam os alimentos e que também retêm sua qualidade nutricional e suas características sensoriais pela redução da dependência do calor como principal meio de conservação (SÃO JOSÉ *et al.*, 2014; ALEXANDRE *et al.*, 2019; LEPAUS *et al.*, 2023).

A conservação é um aspecto crucial da segurança dos alimentos, com intuito de aumentar a vida útil dos produtos, mantendo sua qualidade nutricional, segurança e atributos sensoriais. Os métodos convencionais de conservação, se baseiam principalmente na aplicação de tratamentos térmicos e conservantes químicos. Os tratamentos térmicos tradicionais, como a pasteurização e esterilização,

são eficientes na inativação microbiana, e contribuem para a redução da deterioração do produto e promovem segurança em relação aos microrganismos patogênicos. Entretanto, eles têm um impacto na qualidade sensorial, principalmente na textura, cor, aroma, sabor, gosto e valor nutritivo, que normalmente são afetados pela temperatura (ALEXANDRE *et al.*, 2019). Além disso, existem preocupações ambientais como alto gasto de energia, geração de gases de efeito estufa e a presença potencial de resíduos químicos prejudiciais. Nesse sentido, considerando que atualmente a sustentabilidade é cada vez mais priorizada, a indústria alimentícia precisa buscar novas formas de processar os alimentos aliando inovação e adequação ambiental (LISBOA *et al.*, 2024).

Neste contexto, metodologias inovadoras de processamento não-térmicas e mais sustentáveis têm sido estudadas para aplicação em diferentes tipos de alimentos, buscando a preservação de alimentos sem comprometer sua integridade nutricional ou atributos sensoriais (FUENMAYOR; LICCIARDELLO, 2024; OJHA E YADAV, 2024). Estas tecnologias têm o potencial de serem ambientalmente sustentáveis ao reduzir o consumo de energia e água e, ao mesmo tempo, alcançar a segurança e a qualidade dos alimentos e com ampliação da vida útil dos produtos (CAVALIERE *et al.*, 2018; ALEXANDRE *et al.*, 2019; JIN *et al.*, 2025).

Entre as tecnologias emergentes que vêm sendo estudadas destacam-se campo elétrico pulsado, ultrassom, radiação ultravioleta e irradiação. As pesquisas que avaliam a aplicação dessas tecnologias na tentativa de enfrentar os desafios de produzir alimentos processados seguros com um alto padrão de qualidade sensorial e nutricional (ALEXANDRE *et al.*, 2019; FUENMAYOR; LICCIARDELLO, 2024; JIN; BERMUDEZ-AGUIRRE, 2025).

A aplicação de campos elétricos pulsados (CEP) é uma tecnologia não térmica para conservação de alimentos que usa pulsos de alta voltagem e de curta duração que ocasiona formação de microporos nas membranas celulares culminando na inativação microbiana e tem

efeito mínimo ou nenhum efeito prejudicial sobre os atributos de qualidade dos alimentos (JIN; BERMUDEZ-AGUIRRE, 2025). A formação de poros na membrana celular é denominada de eletroporação. A eletroporação depende do tamanho, tipo e formato da célula, características da membrana, condições do processo, entre outros fatores. Em geral, a presença de poros aumenta a permeabilidade celular através da membrana. Portanto, é possível obter compostos intracelulares presentes no plasma. Além disso, a eletroporação compromete a integridade celular, resultando em alterações em enzimas e proteínas, culminando na inativação microbiana (BRITO; SILVA, 2024). Esta tecnologia foi proposta inicialmente por Sale & Hamilton (1967) no final dos anos 60 para inativar microrganismos em alimentos. Sua aplicação como técnica que visa a substituição do método de pasteurização de alimentos tem sido estudada (RONDINELLI; SILVA, 2024; JIN; BERMUDEZ-AGUIRRE, 2025). Entretanto, atualmente, sabe-se que a tecnologia CEP tem várias aplicações, como para a recuperação de compostos bioativos em matrizes alimentares e resíduos agroalimentares, complexação molecular, modificação de biopolímeros e servindo como tecnologia auxiliar em processos de congelamento/descongelamento e secagem (BRITO e SILVA, 2024).

A aplicação do ultrassom no processamento de alimentos também é uma tecnologia inovadora. Neste método são utilizadas ondas sonoras para alterar e melhorar as propriedades físicas, químicas e microbiológicas dos alimentos (SÃO JOSÉ *et al.*, 2014; LEPAUS *et al.*, 2023). As ondas de ultrassom podem se propagar por qualquer meio como uma onda mecânica dentro de uma faixa de frequência de 20 kHz a 100 MHz, gerando fases de expansão e compressão. Durante este fenômeno induzem a formação, desenvolvimento e implosão de bolhas de cavitação em um meio líquido. Assim, é liberada energia mecânica e química que pode ter diferentes finalidades no processamento de alimentos (SINGLA; SIN, 2021; LEPAUS *et al.*, 2023). O ultrassom pode ser aplicado em diferentes etapas do processamento, como na extração de compostos bioativos, desinfecção, fermentação,

emulsificação, cristalização, cinética de reações e técnica de extração, pasteurização e na melhora da textura dos produtos (SÃO JOSÉ *et al.*, 2014; SINGLA e SIN, 2021; PELISSARI *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2024; PALMA-SALGADO *et al.*, 2025). Uma das grandes vantagens do ultrassom é a capacidade de reduzir o tempo de processamento e o consumo de energia, ao mesmo tempo que preserva as qualidades sensoriais dos alimentos, como sabor, cor e aroma. Além disso, é uma alternativa ecológica, pois diminui a necessidade de aditivos químicos e não gera resíduos tóxicos.

Outra tecnologia que tem despertado o interesse de pesquisadores científicos é o tratamento de alimentos com radiação ultravioleta (WANG *et al.*, 2023). A radiação ultravioleta (UV) se destaca como uma promissora tecnologia inovadora de processamento de alimentos (DELORME *et al.*, 2020). No espectro eletromagnético, a UV compreende a faixa de 100–400 nm, sendo classificada em UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm), UV-C (200–280 nm) e UV a vácuo (100–200 nm). A UV-C é usada principalmente para inativação microbiana, pois pode ser absorvida pelo DNA em torno de 254 nm, nível em que a absorção máxima é atingida (AALIYA *et al.*, 2021). O principal mecanismo de inativação do tratamento UV é a formação de dímeros de pirimidina, que interrompem a transcrição e a tradução das fitas de DNA (WANG *et al.*, 2023). Assim, uma das possibilidades de aplicação na indústria alimentícia é o uso da UV tipo C (200–280 nm) por apresentar ótimas propriedades germicidas para inativar microrganismos como, bactérias, fungos filamentosos, leveduras e vírus). A radiação UV-C pode ser considerada um método eficaz para inativar microrganismos patogênicos e deteriorantes, pois promove a formação de danos no DNA, danos na atividade enzimática celular e integridade da membrana citoplasmática. Entretanto, a eficiência do tratamento por radiação UV depende de uma variedade de fatores, como o tipo de equipamento e seus parâmetros operacionais (tempo de exposição, dose, comprimento de onda e fonte de radiação), características microbianas (espécie, contagem

inicial, fase de crescimento e condições de recuperação) e tipo de produto (composição química, viscosidade, turbidez, opacidade e rugosidade) (SINGH *et al.*, 2021; DELORME *et al.*, 2020). O interessante da proposta da tecnologia é que contribui para segurança microbiológica de alimentos, aumentando a vida útil do produto, sem comprometer a qualidade final. De acordo com Delorme *et al.* (2020), em condições ótimas de aplicação, não há impacto nos aspectos físico-químicos, nutricionais e sensoriais. Além disso, é considerada uma tecnologia de baixo custo de aplicação, o que pode ser um atrativo para aplicação nas linhas de produção de alimentos.

Por fim, temos a tecnologia de irradiação de alimentos que tem sido estudada por mais de um século e sua aplicação potencial a vários alimentos tem sido demonstrada (FAN, 2024). A irradiação ocorre quando alimentos a granel ou embalados passam por uma câmara de radiação (BEVELACQUA; MORTAZAVI, 2020). Este é um método não térmico e físico de conservação de alimentos no qual o alimento é exposto à ação de diferentes doses de radiação ionizante como raios gama, raios-x e feixes de elétrons acelerados para destruir micróbios como vírus, bactérias em alimentos (BISHT *et al.*, 2021; RAMOS; BATISTA, 2023). Uma das formas mais comuns de aplicação da irradiação é com radiação gama, comumente conhecida como “pasteurização a frio”. Ela se enquadra na categoria de radiação de fótons de alta energia, que é uma consequência da decomposição de radionuclídeos (cobalto-60 ou cério-137). Para aplicação do tratamento com irradiação, é preciso ter um local planejado para realização da atividade. Neste local, a fonte de radiação é imersa em uma piscina com água para garantir proteção. Na ocasião da irradiação, o recipiente da fonte de radiação é retirado do reservatório e colocado em uma sala de irradiação, uma área com paredes grossas de concreto para evitar a liberação de raios gama. Os materiais que serão irradiados são transportados para a sala de irradiação por um sistema transportador e expostos à radiação gama por um período previamente definido. Após finalizar o processo de radiação, uma polia mecânica retorna a

fonte de radiação para o reservatório de armazenamento, enquanto o sistema transportador move os itens irradiados para fora da sala de irradiação (HASHIM *et al.*, 2024).

Com relação aos efeitos promovidos pela radiação ionizante pode-se dizer que há efeito direto e indireto. No primeiro caso, os componentes celulares como carboidratos, DNA e lipídios são diretamente danificados pela radiação ionizante. No caso do efeito indireto, os radicais livres e as espécies reativas da radiólise da água reagem com células ou componentes alimentares. O objetivo da aplicação desta tecnologia é estender a vida útil de um produto sem afetar adversamente seus parâmetros nutritivos e sensoriais (BISHT *et al.*, 2021). Um ponto importante em relação a esta tecnologia é a aceitação pelos consumidores. Devido à falta de conhecimento ou informação sobre a irradiação de alimentos, muitos consumidores não acreditam que seja uma tecnologia segura. Isto ocorre pelo fato de existir uma maior preocupação em relação a esta técnica por associá-la a reatores de energia nuclear (BEVELACQUA; MORTAZAVI, 2020). De acordo com Bevelacqua e Mortazavi (2020), a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos considera que a irradiação preserva o valor nutricional dos alimentos e inibe o envelhecimento de frutas e hortaliças e não torna o material irradiado radioativo, o que é um equívoco comum.

Aplicação de embalagens ativas e inteligentes em alimentos

A demanda por alimentos frescos e seguros é crescente devido ao desenvolvimento social e os avanços tecnológicos. Desse modo, a conservação dos alimentos e o monitoramento do frescor são preocupações constantes para consumidores, distribuidores e governos (WANG *et al.*, 2025). Assim, a indústria alimentícia precisa se dedicar a aplicação de métodos para avaliar a qualidade dos alimentos,

como a cromatografia gasosa e líquida. No entanto, esses métodos são onerosos exigindo equipamentos especializados e procedimentos complexos de processamento de amostras, o que os torna pouco atraentes para a avaliação dos alimentos de forma mais rotineira. Portanto, desenvolver métodos mais práticos, rápidos e seguros que auxiliem no controle de qualidade dos alimentos é de extrema relevância (AMIN *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2025). Assim, para além de tecnologias de processamento de alimentos inovadoras, há um estímulo para as inovações em embalagens de alimentos.

Embalagens ativas e inteligentes foram criadas para manter/melhorar a qualidade dos alimentos e estender a função de comunicação da embalagem, respectivamente (AMIN *et al.*, 2022). A embalagem ativa é aquela que possui qualquer substância ou dispositivo que possa estender a vida útil ou manter/melhorar o ambiente da embalagem. Essas substâncias são adicionadas à embalagem de forma intencional para possuírem funções específicas, como liberar ou absorver CO₂, O₂, etileno, odores, sabores, antioxidantes e antimicrobianos (AMIN *et al.*, 2022; DU *et al.*, 2023). No caso da embalagem inteligente, essa pode monitorar fatores ambientais que afetam a qualidade dos alimentos, como temperatura, umidade, conteúdo de O₂, alterações de pH e presença de microrganismos por meio de sensores que estão dispostos na própria estrutura da embalagem (BHOWMIK *et al.*, 2024; XU *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2025). Materiais de embalagem de alimentos inteligentes que monitoram continuamente as condições dos produtos alimentícios usando sensores são amplamente usados no armazenamento e processamento de frutos-do-mar, laticínios e produtos frescos. Esses sistemas garantem a qualidade dos alimentos, reduzem o desperdício de alimentos e podem contribuir para prevenir a ocorrência de infecções e intoxicações alimentares (WANG *et al.*, 2025).

Tendências no mercado de alimentos

Entre outras tendências no mercado de alimentos destacam-se ainda os produtos alimentícios denominados *clean label*, os alimentos funcionais e enriquecidos, os alimentos orgânicos e a utilização de ingredientes que antes eram descartados pela indústria, movidos pela demanda do consumidor por transparência, saúde e sustentabilidade.

Alimentos com rótulos limpos, também denominados *clean label*, são relacionados a produtos alimentícios que além de serem isentos de composto artificiais, com poucos aditivos, ingredientes menos calóricos e menos processados, produzidos de forma mais sustentável também permanecem estáveis durante o armazenamento (ASIOLI, *et al.*, 2017; CANO-LAMADRID *et al.*, 2022; SHELKE, 2020). Garcia *et al.* (2023) discutiram a importância do processamento para a garantia das propriedades desejadas como, as nutricionais, a isenção de contaminante físico, químicos e microbiológicos, além do uso de ingredientes tradicionais que mantenham a viabilidade do alimento, sendo desafios a serem superados pelos produtos *clean label*. Outra preocupação pertinente destacada é a tendência de menor aplicação de tecnologias básicas de processamento, como a pasteurização, favorecendo a exposição ao risco de consumo de determinados alimentos. Ressalta-se que ainda não há regulamentações legais sobre a definição do termo *clean label*, entretanto, a busca por esses produtos impõe um desafio à indústria de alimentos, incluindo a reformulação de produtos e adição de compostos bioativos (ALEXANDRI *et al.*, 2020).

Neste sentido, Vieira *et al.* (2023) propuseram a elaboração de uma maionese *clean label* vegana a partir da substituição dos aditivos por farinha de frutas. Enquanto o ovo foi substituído por proteína de tremço e fava, as farinhas de maçã, nectarina, pera e pêssgo substituem o açúcar, conservantes e corantes. Os autores demonstraram que houve melhora dos parâmetros de estrutura (viscosidade e textura), no pH e na atividade antioxidante em relação à maionese padrão, e

destacaram a farinha de nectarina como a de resultados mais promissores em relação à textura e capacidade antioxidante.

A busca por alimentos que além da oferta de nutrientes básicos fornecem benefícios fisiológicos e terapêuticos, principalmente pelos consumidores mais preocupados com a saúde e qualidade de vida, composição dos alimentos e seus efeitos no corpo, impulsionam o mercado de alimentos funcionais (TAILSELVAN; PRABHASANKAR, 2023). Esse cenário se tornou proeminente, principalmente, após a pandemia da COVID-19, o qual ressaltou que compostos bioativos poderiam auxiliar o sistema imune no combate ao vírus (GALANAKIS, 2020). Assim, no contexto da sindemia global, os alimentos funcionais também poderiam auxiliar na prevenção e maior controle das más nutrições.

Alinhado a este contexto, as fibras alimentares, presentes em frutas, vegetais, grãos e outro alimentos tem efeito na prevenção e tratamento da obesidade devido às suas propriedades físicas como capacidade de retenção de água, capacidade de retenção de óleo, capacidade de adsorção de colesterol, auxiliar no controle do diabetes por meio da sua capacidade de adsorção de glicose, reduzir risco de câncer e beneficiar a saúde intestinal (YE *et al.*, 2022).

No Brasil, a regulamentação não define do termo alimentos funcionais, por sua vez, define alegação de propriedade funcional sendo aquela relativa ao papel metabólico ou fisiológico que o nutriente ou não tem no crescimento, desenvolvimento, manutenção e outras funções normais do organismo humano, enquanto alegação de propriedade de saúde é aquela que afirma, sugere ou implica a existência de relação entre o alimento ou ingrediente com doença ou condição relacionada à saúde (BRASIL, 1999). Nesta regulamentação destaca-se que, no caso de alegação de uma nova propriedade há necessidade de comprovação científica da alegação de propriedades funcionais ou de saúde e da segurança de uso, segundo as *Diretrizes básicas para avaliação de risco e segurança dos alimentos*. De acordo com Nazir *et al.* (2019) um dos desafios para o mercado de alimentos funcionais é a

necessidade de pesquisas de desenvolvimento e eficácia dos efeitos, principalmente, em ensaios clínicos de alto custo que dificultam o investimento neste mercado.

Outra vertente para os alimentos funcionais é a utilização de tecnologias de processamento inovadoras e sustentáveis, como o processamento de alta pressão, o campo elétrico pulsado ou a encapsulação que preservem os compostos bioativos e garantam a segurança microbiana (GALANAKIS, 2021; REQUE; BRANDELLI, 2021).

Nesta proposta, Rodríguez-Roque *et al.* (2016) aplicaram campos elétricos pulsados de alta intensidade, processamento de alta pressão e pasteurização em sucos de frutas a fim de compreender o efeito desses tratamentos na bioacessibilidade e atividade antioxidante lipofílica de carotenoides. Os autores destacaram que a menor bioacessibilidade de carotenoides foi obtida nas bebidas pasteurizadas (perdas de até 63%), sugerindo que o tratamento de alta pressão e campos elétricos pulsados podem ser considerados tecnologias promissoras para obtenção de bebidas altamente nutritivas e funcionais.

O mercado de alimentos também apresenta como inovação os alimentos denominados *free-from*, ou alimentos isentos, termo que designa a ausência de determinadas substâncias em um produto alimentício (HARTMANN *et al.*, 2018). A exemplo desta isenção muitas são motivadas por saúde como alergia a glúten, à soja, intolerância à lactose, mas podem também ser motivadas por questões dietéticas ou mesmo éticas, como produtos isentos de ingredientes de origem animal. Uma preocupação é o consumo de alimentos *free-from* por indivíduos que não tem recomendação médica, baseados em crenças ou autodiagnóstico, como foi demonstrado em estudo húngaro, que demonstraram que parte significativa dos consumidores de alimentos sem lactose ou glúten não possuíam recomendação profissional (KASZA *et al.*, 2023).

Savarese, Wismer e Graffigna (2021) discutem que característica intrínsecas como aroma, aparência e sabor influenciam moderadamente a escolha de alimentos *free-from*, sendo que características

extrínsecas como a rotulagem, informações nutricionais e alegações funcionais estimulam o consumo. Entretanto, os altos preços e a baixa disponibilidade compreendem barreiras do consumo. Este é um desafio para a indústria de alimentos *free-from* uma vez que a elaboração desses produtos pode requerer a utilização de tecnologias avançadas para a obtenção de produtos com características desejáveis pelos consumidores

Outra tendência se baseia nos resíduos gerados pelas indústrias do setor agrícola que geram cerca de 1,3 bilhão de toneladas de resíduos por ano. Deste total, a maioria é atualmente descartada por incineração ou aterro, o que representa desafios ambientais, econômicos e sociais significativos (PRADO-ACEBO *et al.*, 2024). Ao considerar que um dos pontos destacados pelas Nações Unidas para a Agenda 2030 de desenvolvimento sustentável é garantir padrões de consumo e produção sustentáveis, torna-se relevante reduzir a geração e descarte de resíduos por meio da adoção de estratégias de economia circular como prevenção, redução, reciclagem e reutilização (PRADO-ACEBO *et al.*, 2024).

Assim, essa abundância gerada de resíduos agroindustriais pode apresentar um potencial inexplorado e possuir um caminho alternativo que possibilite a recuperação e reutilização. Os resíduos agroindustriais, devido à sua composição podem ser aproveitados para produzir uma ampla gama de produtos, incluindo biocombustíveis, biopolímeros, biofertilizantes, enzimas, nutracêuticos, biogás e em novos produtos alimentícios (PRADO-ACEBO *et al.*, 2024; AHMAD *et al.*, 2024; CHAUDHARY.; SINGH, 2024).

Os subprodutos de diversos alimentos têm uma ampla gama de aplicações e benefícios em todas as indústrias (ARETI *et al.*, 2024). Por exemplo, tem-se a possibilidade da utilização de resíduos de frutas, como cascas, polpa, sementes e outras sobras obtidas no processamento. Estes subprodutos são consideravelmente importantes para o desenvolvimento de produtos alimentícios ao considerar que podem possuir componentes químicos essenciais, como substâncias

biologicamente ativas e polímeros biológicos (SHARMA *et al.*, 2024; 2025). Após tratamentos específicos com agentes físicos e biológicos seguidos por procedimentos de recuperação, é possível obter antioxidantes naturais, agentes antimicrobianos, vitaminas, fibras, oligossacarídeos bioativos, oligopeptídeos e pigmentos. Todos esses compostos naturais podem ser utilizados na formulação de novos produtos alimentícios (FAVA *et al.*, 2013). Esses esforços visam aumentar o valor nutricional dos produtos alimentícios, reduzir o desperdício e promover práticas sustentáveis em toda a indústria de alimentos e bebidas (ARETI *et al.*, 2024).

Assim, a valorização de subprodutos agroindustriais tem a capacidade de promover a sustentabilidade gerando a redução de custos de gerenciamento destes resíduos e desenvolvendo novos bens de valor agregado a partir de uma fonte barata e disponível. Além disso, tem o potencial de melhorar a sustentabilidade social, pois pode promover incremento na produção de alimentos permitindo alimentar uma população global em constante crescimento (AHMAD *et al.*, 2024). Em um dos capítulos deste livro, essa temática será abordada de maneira mais aprofundada.

Considerações finais

A inovação na área de produção de alimentos tem direcionado seus esforços para a criação de produtos que atendam não apenas às exigências sensoriais e nutricionais dos consumidores, mas também à necessidade de alimentos mais sustentáveis. Isso inclui a substituição de ingredientes por motivos de saúde ou princípios éticos, visando a obtenção de produtos mais saudáveis, seguros, funcionais e sustentáveis. Para alcançar esses objetivos, são fundamentais o desenvolvimento de novos produtos e a aplicação de tecnologias que promovam rótulos limpos e práticas sustentáveis.

Os avanços das pesquisas relacionadas a tecnologias de processamento têm sido promissores e vão de encontro com a necessidade de melhorar a qualidade, a segurança e o prazo de validade dos alimentos. Assim, agregam à crescente demanda dos consumidores que estão cada vez mais conscientes em relação aos aspectos de saúde e da sustentabilidade. Dessa forma, a continuidade do desenvolvimento de pesquisas na área alimentícia pode contribuir ainda mais para a redução dos impactos da sindemia global e promover a produção de alimentos seguros.

Referências

- AALIYA, B. *et al.* Recent trends in bacterial decontamination of food products by hurdle technology: a synergistic approach using thermal and non-thermal processing techniques. **Food Research International**, [s. l], v. 147, p. 110514, 2021.
- AHMAD, T.; ESPOSITO, F.; CIRILLO, T. Valorization of agro-food by-products: advancing sustainability and sustainable development goals 2030 through functional compounds recovery. **Food Bioscience**, [s. l], v. 62, p. 105194, 2024.
- AL RAJABI, A. *et al.* Towards refining World Cancer Research Fund/ American Institute for Cancer Research cancer prevention recommendations for red and processed meat intake: insights from Alberta's Tomorrow Project cohort. **British Journal of Nutrition**, [s. l], v. 127, n. 4, p. 607-618, 2022.
- ALEXANDRE, E. M. C. *et al.* Nonthermal food processing/preservation technologies. In: **Saving Food**. [S. l]: [s. n.], 2019. p. 141-169.
- ALEXANDRI, M. *et al.* Sustainable food systems: the case of functional compounds towards the development of clean label food products. **Foods**, [s. l], v. 11, n. 18, p. 2796, 2022.
- AMARA, A. A.; EL-BAKY, N. A. Fungi as a source of edible proteins and animal feed. **Journal of Fungi**, [s. l], v. 9, n. 1, p. 73, 2023.

- AMIN, U. *et al.* Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 33, p. 100903, 2022.
- ASIOLI, D. *et al.* Making sense of the “clean label” trends: a review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. **Food Research International**, [s. l.], v. 99, p. 58-71, 2017.
- AYED, C. *et al.* The role of sodium chloride in the sensory and physico-chemical properties of sweet biscuits. **Food Chemistry**: X, [s. l.], v. 9, p. 100-115, 2021.
- BERTELSEN, A. S. *et al.* Cross-modal effect of vanilla aroma on sweetness of different sweeteners among Chinese and Danish consumers. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 87, p. 104036, 2021.
- BEVELACQUA, J. J.; MORTAZAVI, S. M. J. Can irradiated food have an influence on people’s health? *In*: ANDERSEN, V. (ed.). **Genetically Modified and Irradiated Food**. [S. l.]: [s. n.], 2020. p. 243-257.
- BHAT, Z. F. *et al.* The application of pulsed electric field as a sodium reducing strategy for meat products. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 306, p. 125622, 2020.
- BHOWMIK, S.; AGYEI, D.; ALI, A. Smart chitosan films as intelligent food packaging: an approach to monitoring food freshness and biomarkers. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 46, p. 101370, 2024.
- BIGLIARDI, B.; FILIPPELLI, S. A review of the literature on innovation in the agrofood industry: sustainability, smartness and health. **European Journal of Innovation Management**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 589-611, 2022.
- BIHOLA, A. *et al.* Technological innovations in margarine production: current trends and future perspectives on trans-fat removal and saturated fat replacement. **Comprehensive Reviews**

- in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. e70088, 2025.
- BISHT, B. *et al.* Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 114, p. 372-385, 2021.
- BRASIL. Instrução Normativa nº 75, de 8 de outubro de 2020. Estabelece os requisitos técnicos para declaração da rotulagem nutricional nos alimentos embalados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-in-n-75-de-8-de-outubro-de-2020-282071143>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **VIGITEL – Vigilância de fatores de risco e proteção para doenças crônicas por inquérito telefônico**: estimativas sobre frequência e distribuição socio-demográfica de fatores de risco e proteção para doenças crônicas nas capitais dos 26 estados brasileiros e no Distrito Federal em 2023. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101742.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2025.
- BRASIL. Resolução nº 18, de 30 de abril de 1999. Diretrizes básicas para análise e comprovação de propriedades funcionais e ou de saúde alegadas em rotulagem de alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 maio 1999. Disponível em: https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RES&numeroAto=00000018&seqAto=000&valorAno=1999&orgao=ANVISA/MS&codTipo=&desItem=&desItemFim=&cod_menu=1696&cod_modulo=134&pesquisa=true. Acesso em: 15 set. 2025.
- BRASIL. Resolução RDC nº 429, de 8 de outubro de 2020. Dispõe sobre a rotulagem nutricional dos alimentos embalados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/>

- [resolucao-de-diretoria-colegiada-rdc-n-429-de-8-de-outubro-de-2020-282070599](#). Acesso em: 20 fev. 2025.
- BRASIL. Resolução RDC nº 632, de 24 de março de 2022. Dispõe sobre a restrição de uso de gorduras trans industriais em alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2022. Disponível em: https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RDC&numeroAto=00000632&seqAto=000&valorAno=2022&orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&codTipo=&desItem=&desItemFim=&cod_menu=9434&cod_modulo=310&pesquisa=true. Acesso em: 20 fev. 2025.
- BRITO, I. P. C.; SILVA, E. K. Pulsed electric field technology in vegetable and fruit juice processing: a review. **Food Research International**, [s. l.], v. 184, p. 114207, 2024.
- BRYNGELSSON, S. *et al.* Nutritional assessment of plant-based meat analogues on the Swedish market. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, [s. l.], v. 73, n. 7, p. 889-901, 2022.
- CANO-LAMADRID, M. *et al.* Introduction. In: GALANAKIS, C. M. (ed.). **The Age of Clean Label Foods**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022. p. 1-35.
- CARCELLI, A. *et al.* A fibre syrup for the sugar reduction in fruit filling for bakery application. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 28, p. 100545, 2022.
- CAVALIERE, A.; VENTURA, V. Mismatch between food sustainability and consumer acceptance toward innovation technologies among Millennial students: the case of Shelf Life Extension. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 175, p. 641-650, 2018.
- CHAUDHARY, S.; SINGH, B. Grapefruit peel waste: unlocking the potential for industrial applications in the circular economy. **Food Science and Biotechnology**, [s. l.], 2024.
- CHEN, J. *et al.* Effect of NaCl substitutes on the physical, microbial and sensory characteristics of Harbin dry sausage. **Meat Science**, [s. l.], v. 156, p. 205-213, 2019.

- CHEN, Z. *et al.* Seaweed as a sustainable future food source. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 3, p. 1237-1247, 2024.
- CHEZAN, D.; FLANNERY, O.; PATEL, A. Factors affecting consumer attitudes to fungi-based protein: a pilot study. **Appetite**, [s. l.], v. 175, p. 106043, 2022.
- CHODKOWSKA, K. A.; WÓDZ, K.; WOJCIECHOWSKI, J. Sustainable future protein foods: the challenges and the future of cultivated meat. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 24, p. 4008, 2022.
- CHOTELERSAK, K. *et al.* In vitro cultured meat: nutritional aspects for the health and safety of future foods. **Trends in Sciences**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 9060, 2025.
- DAWCZYNSKI, C.; LORKOWSKI, S. Trans-fatty acids and cardiovascular risk: does origin matter? **Expert Review of Cardiovascular Therapy**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 1001-1005, 2016.
- DE ANGELIS, D. *et al.* Antinutritional factors, mineral composition and functional properties of dry fractionated flours as influenced by the type of pulse. **Heliyon**, [s. l.], v. 7, n. 2, 2021.
- DE BOER, J.; AIKING, H. Considering how farm animal welfare concerns may contribute to more sustainable diets. **Appetite**, [s. l.], v. 168, p. 105786, 2022.
- DELORME, M. M. *et al.* Ultraviolet radiation: an interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 102, p. 146-154, 2020.
- DERBYSHIRE, E. J. *et al.* Food for our future: the nutritional science behind the sustainable fungal protein–mycoprotein: a symposium review. **Journal of Nutritional Science**, [s. l.], v. 12, p. e44, 2023.
- DIMOPOULOU, M. *et al.* Nutritional composition and biological properties of sixteen edible mushroom species. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 16, p. 8074, 2022.

- DOS SANTOS, M. *et al.* Strategies for the reduction of salt in food products. *In: Food structure engineering and design for improved nutrition, health and well-being*. [S. l.]: Academic Press, 2023. p. 187-218.
- DU, H. *et al.* A review on smart active packaging systems for food preservation: applications and future trends. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], v. 141, p. 104200, 2023.
- ENDY, E. J. *et al.* Added sugar intake is associated with weight gain and risk of developing obesity over 30 years: the CARDIA study. **Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 466-474, 2024.
- ERBIAI, E. H. *et al.* Chemical composition, bioactive compounds, and antioxidant activity of two wild edible mushrooms *Armillaria mellea* and *Macrolepiota procera* from two countries (Morocco and Portugal). **Biomolecules**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 575, 2021.
- FAN, X. Food irradiation. *In: Encyclopedia of Food Safety*. [S. l.]: [s. n.], 2024. p. 599-611.
- FAVA, F. *et al.* New advances in the integrated management of food processing by-products in Europe: sustainable exploitation of fruit and cereal processing by-products with the production of new food products (NAMASTE EU). **New Biotechnology**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 647-655, 2013.
- FILHO, E. *et al.* Dynamic aspects of salt reduction in tomato sauce by use of flavor enhancers and a bitter blocker. **Food Science and Technology International**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 549-559, 2020.
- FRAEYE, I. *et al.* Sensorial and nutritional aspects of cultured meat in comparison to traditional meat: much to be inferred. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 7, p. 35, 2020.
- FUENMAYOR, C. A.; LICCIARDELLO, F. The challenges of food preservation materials and technologies for a more sustainable world. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], p. 101273, 2024.
- FUKAMI, Y. *et al.* Physical properties of bloom-resistant chocolate using palm-based no-trans cocoa butter replacers. **Journal**

- of the American Oil Chemists' Society, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 311-322, 2025.
- GALANAKIS, C. M. Functionality of food components and emerging technologies. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 128, 2021.
- GALANAKIS, C. M. The food systems in the era of the coronavirus (COVID-19) pandemic crisis. **Foods**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 523, 2020.
- GALANAKIS, C. M. The future of food. **Foods**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 506, 2024.
- GARCIA, E. E. C. *et al.* **Estudo regulatório sobre proteínas alternativas no Brasil – Proteínas vegetais**. São Paulo: The Good Food Institute, 2022. 115 p. Disponível em: <https://gfi.org.br/wp-content/uploads/2022/11/Estudo-Regulatorio-Proteinas-Vegetais-GFI-Brasil.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.
- GARCIA, E. E. C. *et al.* (ed.). **Brasil Food Safety Trends 2030**: transformações, tendências e desafios para a governança da e gestão da segurança dos alimentos. 1. ed. Campinas: ITAL, 2023. Disponível em: <https://ital.agricultura.sp.gov.br/documento/food-safety>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- GHIMPEȚEANU, O. M. *et al.* Antibiotic use in livestock and residues in food—a public health threat: a review. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1430, 2022.
- GIACOMOZZI, A. S.; CARRÍN, M. E.; PALLA, C. A. Muffins elaborated with optimized monoglycerides oleogels: from solid fat replacer obtention to product quality evaluation. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 83, n. 6, p. 1505-1515, 2018.
- GOLDFEIN, K. R.; SLAVIN, J. L. Why sugar is added to food: food science 101. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 644-656, 2015.
- GROSSMANN, L.; WEISS, J. Alternative protein sources as technofunctional food ingredients. **Annual Review of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 93-117, 2021.

- HAN, J.-H. *et al.* Comparative evaluation of polysaccharide binders on the quality characteristics of plant-based patties. **Foods**, [s. l], v. 12, n. 20, p. 3731, 2023.
- HARIDASAN, N. N. *et al.* Impact of salt and fat reduction under low pressure mixing on pizza dough properties. **LWT**, [s. l], p. 117410, 2025.
- HARTMANN, C. *et al.* European consumer healthiness evaluation of ‘Free-from’labelled food products. **Food Quality and Preference**, [s. l], v. 68, p. 377-388, 2018.
- HASHIM, M. S.; YUSOP, S. M.; RAHMAN, I. A. The impact of gamma irradiation on the quality of meat and poultry: a review on its immediate and storage effects. **Applied Food Research**, [s. l], v. 4, n. 2, p. 100444, 2024.
- HE, Y. *et al.* Effects of dietary fiber on human health. **Food Science and Human Wellness**, [s. l], v. 11, n. 1, p. 1-10, 2022.
- HERRMANN, M. *et al.* A comparative nutritional life cycle assessment of processed and unprocessed soy-based meat and milk alternatives including protein quality adjustment. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l], v. 8, p. 1413802, 2024.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de orçamentos familiares: 2017-2018: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101742.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2025.
- JIN, T. Z.; BERMUDEZ-AGUIRRE, D. Application of pulsed electric fields in food processing and preservation. In: BERMUDEZ-AGUIRRE, D. (ed.). **Innovative Food Packaging and Processing Technologies**. [S. l]: [s. n.], 2025. p. 3-43.
- KASZA, G. *et al.* How many Hungarian consumers choose lactose-and gluten-free food products even when they do not necessarily need to? **Foods**, [s. l], v. 12, n. 21, p. 3984, 2023.

- KHEMIRI, S. *et al.* Technological feasibility of couscous-algae-supplemented formulae: process description, nutritional properties and in vitro digestibility. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 3159, 2021.
- KIRSCH, M.; MORALES-DALMAU, J.; LAVRENTIEVA, A. Cultivated meat manufacturing: technology, trends, and challenges. **Engineering in Life Sciences**, [s. l.], v. 23, n. 12, p. e2300227, 2023.
- KISTLER, T. *et al.* Modulation of sweetness perception in confectionary applications. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 88, p. 104087, 2021.
- KODALI, D. R. Trans fats: health, chemistry, functionality, and potential replacement solutions. *In: Trans fats replacement solutions*. [S. l.]: AOCS Press, 2014. p. 1-39.
- KYRIAKOPOULOU, K.; KEPPLER, J. K.; VAN DER GOOT, A. J. Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 600, 2021.
- LANGE, K. W.; NAKAMURA, Y. Edible insects as future food: chances and challenges. *Journal of Future Foods*, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 38-46, 2021.
- LARA-CASTOR, L. *et al.* Burdens of type 2 diabetes and cardiovascular disease attributable to sugar-sweetened beverages in 184 countries. **Nature Medicine**, [s. l.], p. 1-13, 2025.
- LEPAUS, B. M. *et al.* Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 138, p. 752-765, 2023.
- LI, K. *et al.* Nutritional values and bio-functional properties of fungal proteins: applications in foods as a sustainable source. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 24, p. 4388, 2023.
- LIMA, M. *et al.* A narrative review of alternative protein sources: highlights on meat, fish, egg and dairy analogues. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 14, p. 2053, 2022.
- LISBOA, H. M. *et al.* Innovative and sustainable food preservation techniques: enhancing food quality, safety, and environmental

- sustainability. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 18, p. 8223, 21 set. 2024.
- LUAN, M. *et al.* Association of plasma trans fatty acid concentrations with blood pressure and hypertension in US adults. **Frontiers in Endocrinology**, [s. l.], v. 15, p. 1373095, 2024.
- MA, T. *et al.* Transdifferentiation of fibroblasts into muscle cells to constitute cultured meat with tunable intramuscular fat deposition. **Elife**, [s. l.], v. 13, p. RP93220, 2024.
- MACHOVINA, B.; FEELEY, K. J.; RIPPLE, W. J. Biodiversity conservation: the key is reducing meat consumption. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 536, p. 419-431, 2015.
- MANDALKA, A. *et al.* Nutritional composition of beach-cast marine algae from the Brazilian coast: added value for algal biomass considered as waste. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1201, 2022.
- MANDLIYA, S. *et al.* Incorporation of mycelium (*Pleurotus Eryngii*) in pea protein based low moisture meat analogue: effect on its physicochemical, rehydration and structural properties. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 16, p. 2476, 2022.
- MARCHESE, L. E. *et al.* Modelling the impact of substituting meat and dairy products with plant-based alternatives on nutrient adequacy and diet quality. **The Journal of Nutrition**, [s. l.], 2024.
- MCKENZIE, E.; LEE, S.-Y. Sugar reduction methods and their application in confections: a review. **Food Science and Biotechnology**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 387-398, 2022.
- MICHA, R.; MOZAFFARIAN, D. Trans fatty acids: effects on cardiometabolic health and implications for policy. **Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids**, [s. l.], v. 79, n. 3-5, p. 147-152, 2008.
- MILNER, L. *et al.* Physical, textural and sensory characteristics of reduced sucrose cakes, incorporated with clean-label sugar-replacing alternative ingredients. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 59, p. 102235, 2020.

- MSANNE, J.; KIM, H.; CAHOON, E. B. Biotechnology tools and applications for development of oilseed crops with healthy vegetable oils. **Biochimie**, [s. l.], v. 178, p. 4-14, 2020.
- MÜLLER, D. C. *et al.* Enzymatic and microbial conversions to achieve sugar reduction in bread. **Food Research International**, [s. l.], v. 143, p. 110296, 2021.
- NAGPAL, T. *et al.* Trans fatty acids in food: a review on dietary intake, health impact, regulations and alternatives. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 86, n. 12, p. 5159-5174, 2021.
- NAZIR, M. *et al.* Opportunities and challenges for functional and medicinal beverages: current and future trends. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 88, p. 513-526, 2019.
- OJHA, K.; YADAV, A. Preservation innovation: modern methods and techniques redefining food longevity. *In: Agricultural Revolution: Present, Past and Future*. [S. l.]: Elite Publishing House, 2024. p. 97-111.
- OLIVEIRA, D. *et al.* Sugar reduction in probiotic chocolate-flavored milk: impact on dynamic sensory profile and liking. **Food Research International**, [s. l.], v. 75, p. 148-156, 2015.
- OPAS – Organização Pan-Americana da Saúde. **Metas regionales actualizadas de la OPS para la reducción del sodio**. [S. l.]: OPAS, 2021. Disponível em: <https://iris.paho.org>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- ÖZLÜ, Z. C.; BÖLEK, S. Use of Neopyropia yezoensis in enriching vegan kefir from oat milk. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 38, p. 101045, 2024.
- PALMA-SALGADO, S. *et al.* Attachment and removal of porcine rotavirus (PRV) and Tulane virus (TV) on fresh and artificial phylloplanes of Romaine lettuce and Carmel spinach as affected by ultrasonication in combination with oxidant- or surfactant-based sanitizer(s). **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], v. 429, p. 111020, 2025.

- PEKER, A. *et al.* A comprehensive outlook on cultivated meat and conventional meat production. **Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi**, [s. l.], v. 71, n. 4, 2024.
- PELISSARI, E. M. R. *et al.* Application of chemometrics to assess the influence of ultrasound and chemical sanitizers on vegetables: impact on natural microbiota, Salmonella Enteritidis and physicochemical nutritional quality. **LWT**, [s. l.], v. 148, p. 111711, 2021.
- PEREIRA, L.; COTAS, J.; GONÇALVES, A. M. M. Seaweed proteins: a step towards sustainability? **Nutrients**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 1123, 10 abr. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/16/8/1123/pdf?version=1712822895>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- QAZI, W. M. *et al.* Protein enrichment of wheat bread with the marine green microalgae Tetraselmis chuii–Impact on dough rheology and bread quality. **LWT**, [s. l.], v. 143, p. 111115, 2021.
- QIU, Y. *et al.* Analysis of key fungi and their effect on the edible quality of HongJun tofu, a Chinese fermented okara food. **LWT**, [s. l.], v. 172, p. 114151, 2022.
- QIU, Y. *et al.* Construction of 3D printed meat analogs from plant-based proteins: improving the printing performance of soy protein-and gluten-based pastes facilitated by rice protein. **Food Research International**, [s. l.], v. 167, p. 112635, 2023.
- RABADÁN, A.; NIETO, R.; BERNABÉU, R. Food innovation as a means of developing healthier and more sustainable foods. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 2069, 2021.
- RAMOS, R.; BATISTA, E. V. Irradiação de alimentos: revisão comparativa, histórica e difusão do processo. **Brazilian Journal of Science**, [s. l.], v. 2, n. 8, p. 94-103, 2023.
- REGLERO, G. *et al.* Meat-based functional foods for dietary equilibrium omega-6/omega-3. **Molecular Nutrition & Food Research**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 1153-1161, 2008.
- REKDAL, V. M. *et al.* From lab to table: expanding gastronomic possibilities with fermentation using the edible fungus Neurospora

- intermedia. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 34, p. 100826, 2023.
- REQUE, P. M.; BRANDELLI, A. Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: applications in functional food industry. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 114, p. 1-10, 2021.
- RICHARDSON, A. M. *et al.* The impact of sugar particle size manipulation on the physical and sensory properties of chocolate brownies. **LWT**, [s. l.], v. 95, p. 51-57, 2018.
- RICHI, E. B. *et al.* Health risks associated with meat consumption: a review of epidemiological studies. **International Journal for Vitamin and Nutrition Research**, [s. l.], 2016.
- RODRÍGUEZ-ROQUE, M. J. *et al.* Food matrix and processing influence on carotenoid bioaccessibility and lipophilic antioxidant activity of fruit juice-based beverages. **Food & Function**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 380-389, 2016.
- RONDINELLI, A.; SILVA, E. K. Pulsed electric field as a pre-treatment in food freezing processes: fundamentals, mechanisms, applications and impacts on frozen food quality. **Food Bioscience**, [s. l.], p. 104275, 2024.
- ROSA, E. A. A.; MARTINS, M. A.; DALA-PAULA, B. Redução de sódio em alimentos processados: uma revisão narrativa da literatura. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, [s. l.], v. 16, n. 2, 2022.
- RUSSELL, C. *et al.* The drivers, trends and dietary impacts of non-nutritive sweeteners in the food supply: a narrative review. **Nutrition Research Reviews**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 185-208, 2021.
- RUSSELL, W. M. S. *et al.* **The principles of humane experimental technique**. London: Methuen, 1959.
- SÃO JOSÉ, J. F. B. de *et al.* Decontamination by ultrasound application in fresh fruits and vegetables. **Food Control**, [s. l.], v. 45, p. 36-50, nov. 2014.
- SAVARESE, M.; WISMER, W.; GRAFFIGNA, G. Conceptualizing “free-from” food consumption determinants: a systematic

- integrative literature review focused on gluten and lactose. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 90, p. 104170, 2021.
- SCHWEIGGERT-WEISZ, U. *et al.* Opinion piece: New plant-based food products between technology and physiology. **Molecular Nutrition & Food Research**, [s. l.], v. 68, n. 20, p. 2400376, 2024.
- SCOONES, I. Livestock, methane, and climate change: the politics of global assessments. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. e790, 2023.
- SELVAKUMAR, P.; MANJUNATH, T. C. Food technology innovation. *In: Industrial Application of Functional Foods, Ingredients and Nutraceuticals*. [S. l.]: Academic Press, 2025. p. 215-242.
- SEO, J. W. *et al.* Development of cultivable alginate fibers for an ideal cell-cultivated meat scaffold and production of hybrid cultured meat. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 321, p. 121287, 2023.
- SHARMA, S. *et al.* Captivating actions of pomological crops waste as biosorbents for environmental remediation: a comprehensive review. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], 2024.
- SHARMA, S. *et al.* Exploring the valorization of fruit bio-waste for sustainable utilization in agro-food industries: a comprehensive review. **Food Bioscience**, [s. l.], p. 105768, 2025.
- SHELKE, K. Clearing up clean label confusion. **Food Technology**, [s. l.], v. 74, n. 2, p. 40-51, 2020.
- ŞİMŞEK, E. K. *et al.* Sustainability and the food industry: a bibliometric analysis. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 3070, 2024.
- SINGH, B. *et al.* Red meat consumption and its relationship with cardiovascular health: a review of pathophysiology and literature. **Cardiology in Review**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 49-53, 2025.
- SINGH, H. *et al.* UVC radiation for food safety: an emerging technology for the microbial disinfection of food products. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 417, p. 128084, 2021.

- SONG, Y. *et al.* A prospective study of red meat consumption and type 2 diabetes in middle-aged and elderly women: the women's health study. **Diabetes Care**, [s. l.], v. 27, n. 9, p. 2108-2115, 2004.
- SOOD, S.; METHVEN, L.; CHENG, Q. Role of taste receptors in salty taste perception of minerals and amino acids and developments in salt reduction strategies: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], p. 1-15, 2024.
- SILVA, H. *et al.* Effect of sodium reduction and flavor enhancer addition on probiotic Prato cheese processing. **Food Research International**, [s. l.], v. 99, p. 247-255, 2017.
- SILVA, R. C. da *et al.* Oleogels as a fat substitute in food: a current review. **Gels**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 180, 2023.
- SPECHT, E. A. *et al.* Opportunities for applying biomedical production and manufacturing methods to the development of the clean meat industry. **Biochemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 132, p. 161-168, 2018.
- STAVALE, M. D. O.; ASSUNÇÃO BOTELHO, R. B.; ZANDONADI, R. P. Apple as sugar substitute in cake. **Journal of Culinary Science & Technology**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 224-231, 2019.
- STEELE, E. M. *et al.* Ultra-processed foods and added sugars in the US diet: evidence from a nationally representative cross-sectional study. **BMJ Open**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. e009892, 2016.
- STOFFEL, F. *et al.* Use of *Pleurotus albidus* mycoprotein flour to produce cookies: evaluation of nutritional enrichment and biological activity. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 68, p. 102642, 2021.
- SU, T. *et al.* Technological challenges and future perspectives of plant-based meat analogues: from the viewpoint of proteins. **Food Research International**, [s. l.], p. 114351, 2024.
- SUNA, S.; ÇOPUR, Ö. U. A new approach: replacement and alternative foods for food industry. *In: Alternative and Replacement Foods*. [S. l.]: [s. n.], 2018. p. 1-30.

- SURYAMIHARJA, A.; GONG, X.; ZHOU, H. Towards more sustainable, nutritious, and affordable plant-based milk alternatives: a critical review. **Sustainable Food Proteins**, [s. l.], 2024.
- SWINBURN, B. A. *et al.* The global syndemic of obesity, undernutrition, and climate change: the Lancet Commission report. **The Lancet**, [s. l.], v. 393, n. 10173, p. 791-846, 2019.
- TAMANG, J. P.; WATANABE, K.; HOLZAPFEL, W. H. Diversity of microorganisms in global fermented foods and beverages. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 7, p. 377, 2016.
- TAMILSELVAN, T.; PRABHASANKAR, P. Innovative functional foods. In: **Industrial Application of Functional Foods, Ingredients and Nutraceuticals**. [S. l.]: Academic Press, 2023. p. 433-470.
- TAY, J. U. *et al.* 3D printing of salmon fillet mimic: imparting printability via high-pressure homogenization and post-printing texturization via transglutaminase. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 140, p. 108564, 2023.
- TIMONEDA, A.; AMIRVARESI, A.; OVISSIPOUR, R. Black soldier fly bioconversion to cultivated meat media components using blue catfish gut microbiome. **Bioresource Technology Reports**, [s. l.], v. 26, p. 101834, 2024.
- UMBRELLO, S. **Beyond the lab**: ethical and cultural contemplations on cultivated meat. [S. l.]: [s. n.], 2024.
- VIEIRA, M. R. *et al.* Development of a clean label mayonnaise using fruit flour. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2111, 2023.
- VOGEL, P. A. *et al.* Expression of the Arabidopsis WRINKLED 1 transcription factor leads to higher accumulation of palmitate in soybean seed. **Plant Biotechnology Journal**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 1369-1379, 2019.
- WANG, J. *et al.* Ultraviolet-radiation technology for preservation of meat and meat products: recent advances and future trends. **Food Control**, [s. l.], v. 148, p. 109684, 2023.

- WANG, Y. *et al.* Intelligent food packaging materials: principles, types, applications, and hydrophobization. **Food Control**, [s. l], v. 171, p. 111138, 2025.
- WILLETT, W. *et al.* Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission report. **The Lancet**, [s. l], v. 393, n. 10170, p. 447–492, 2019.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guideline**: potassium intake for adults and children. [S. l]: WHO, 2012.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guideline**: sugars intake for adults and children. [S. l]: WHO, 2015.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Saturated fatty acid and trans-fatty acid intake for adults and children**: WHO guideline. [S. l]: WHO, 2023.
- XU, M. *et al.* Recent advances in anthocyanin-based films and its application in sustainable intelligent food packaging: a review. **Food Control**, [s. l], p. 110431, 2024.
- YU, Q. *et al.* Analysis of nutritional composition in 23 kinds of edible fungi. **Journal of Food Quality**, [s. l], v. 2020, n. 1, p. 8821315, 2020.
- ZHAO, Y. *et al.* Preparation of hydrogenated soybean oil of high oleic oil with supported catalysts. **Food Bioscience**, [s. l], v. 22, p. 91–98, 2018.
- ZHEN, C. *et al.* Preparation of a trans-free fat blend to substitute partially hydrogenated oil. **Journal of Food Engineering**, [s. l], v. 388, p. 112377, 2025.
- ZHOU, S.; CHEN, W.; FAN, K. Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: a review. **Food Bioscience**, [s. l], v. 58, p. 103683, abr. 2024.
- ZHOU, Y. *et al.* High pressure processing improves the sensory quality of sodium-reduced chicken sausage formulated with three anion types of potassium salt. **Food Control**, [s. l], v. 126, p. 108008, 2021.

Métodos alternativos aos compostos clorados na sanitização de frutas e hortaliças

*Bárbara Morandi Lepaus • Priscila Donatti Leão Alvarenga •
Jackline Freitas Brilhante de São José*

Diversos fatores contribuem para a elevada presença de microrganismos em frutas e hortaliças. Entre eles, destacam-se o uso de adubo orgânico não tratado, a proximidade de animais selvagens ou domésticos, a irrigação com água contaminada, condições inadequadas de armazenamento e transporte, e práticas inadequadas de manuseio e preparo (BHATIA *et al.*, 2024). Diante desses desafios, é fundamental adotar medidas preventivas durante e após a colheita, como o uso de água de qualidade para irrigação, a sanitização adequada de frutas, hortaliças, equipamentos e utensílios, e a prevenção de contaminação cruzada. Essas práticas são essenciais para garantir a segurança microbiológica desses alimentos (GIL *et al.*, 2015; MENDOZA *et al.*, 2022).

Segundo a Organização Mundial da Saúde, estima-se que a cada ano, 600 milhões de pessoas adoecem e 420 mil morrem devido a

alimentos contaminados e impróprios para o consumo. Crianças com menos de 5 anos de idade correm particularmente um risco mais alto, com 125.000 crianças morrendo de doenças de origem alimentar todos os anos (WHO, [s.d.]). A lavagem de alimentos frescos apenas com água corrente não é suficiente para remover adequadamente os microrganismos presentes em sua superfície (LEBLANC *et al.*, 2021; PETRI *et al.*, 2021). Embora essa estratégia promova a remoção de sujidades visíveis, como insetos, terra e outros resíduos aderidos (RAFFO; PAOLETTI, 2022), a segurança microbiológica e a qualidade de frutas e hortaliças só podem ser garantidas por meio da combinação da lavagem com a sanitização, utilizando agentes químicos ou físicos. Essa abordagem visa reduzir a população de microrganismos deterioradores e eliminar patógenos, e assim, prolongar a vida útil dos produtos sem comprometer as características sensoriais e nutricionais (CHINCHKAR *et al.*, 2022). Dessa forma, a eficiência dos processos de limpeza, lavagem e sanitização influencia diretamente a qualidade microbiológica do produto e sua vida de prateleira.

Comercialmente, os agentes químicos à base de cloro são os sanitizantes mais utilizados na indústria de alimentos devido ao seu amplo espectro de ação antimicrobiana, custo relativamente baixo, facilidade de uso e impacto mínimo sobre a qualidade do produto (YOON; LEE, 2018; PELISSARI *et al.*, 2021). Esses sanitizantes são amplamente empregados na lavagem de alimentos crus, bem como na limpeza e sanitização de utensílios e equipamentos (SIMPSON; MITCH, 2022). No entanto, os sanitizantes à base de cloro apresentam eficácia limitada na redução de contaminantes patogênicos. Além disso, os compostos clorados podem gerar impactos negativos ao meio ambiente, o que tem sido motivo de grande preocupação. A interação entre compostos clorados e matéria orgânica pode resultar na formação de organoclorados, trihalometanos e ácidos haloacéticos, substâncias com potencial mutagênico e carcinogênico (YOON; LEE, 2018). O descarte desses subprodutos no meio ambiente, assim como sua presença residual nos alimentos, pode contaminar fontes

de água potável, afetar espécies aquáticas e terrestres e representar riscos à saúde humana.

Observa-se que a lavagem e o uso de compostos clorados não são totalmente eficazes na etapa de sanitização de produtos minimamente processados, tornando necessária a adoção de novas estratégias que garantam a qualidade higiênico-sanitária desses alimentos. Por essa razão, diversas metodologias de desinfecção, incluindo métodos físicos e químicos, têm sido investigadas como alternativas ao uso de compostos clorados na sanitização de frutas e hortaliças. Entre os métodos químicos, destacam-se agentes antimicrobianos naturais e geralmente reconhecidos como seguros (GRAS, do inglês *Generally Recognized as Safe*), como ácidos orgânicos e óleos essenciais. Já os métodos físicos incluem tecnologias não-térmicas, como ultrassom e alta pressão hidrostática, que são particularmente vantajosas devido à termossensibilidade de muitos micronutrientes presentes nesses alimentos.

Neste capítulo, serão discutidos alguns dos métodos alternativos de sanitização de frutas e hortaliças, como o uso de ácidos orgânicos, óleos essenciais, extratos de plantas, ultrassom, alta pressão hidrostática e radiação UV, com enfoque em seus mecanismos de inativação microbiana e nos efeitos sobre a qualidade dos alimentos tratados.

Aplicação de compostos clorados na sanitização

Sanitizantes à base de cloro, como o hipoclorito de cálcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), hipoclorito de sódio (NaClO) e dióxido de cloro (ClO_2), são utilizados na sanitização de frutas e hortaliças frescas (SHAHBAZ *et al.*, 2018). Na etapa de sanitização desses alimentos é comum empregar concentrações de 50 a 200 mg/L de cloro residual, sendo que o tempo de exposição varia de acordo com o tipo de alimento, a concentração da solução e o microrganismo-alvo. A inativação microbiana por sanitizantes à base de cloro ocorre principalmente por três

mecanismos: alteração da permeabilidade da membrana citoplasmática, danos ao DNA causados por compostos derivados do cloro e inibição de enzimas envolvidas na síntese dos componentes da parede celular (YOON; LEE, 2018).

Apesar de seu uso generalizado, a aplicação de sanitizantes à base de cloro apresenta eficiência limitada na desinfecção, alcançando, em geral, redução de um a dois ciclos logarítmicos da contagem inicial de microrganismos presentes no alimento (DENG *et al.*, 2020). Além disso, alguns microrganismos patogênicos podem desenvolver resistência a esses compostos, o que reforça a necessidade de uma análise criteriosa quanto ao seu uso na indústria de alimentos (BLAND *et al.*, 2022).

É importante destacar que a eficácia antimicrobiana desses sanitizantes depende diretamente da concentração de cloro livre na solução. No entanto, o excesso de cloro livre pode levar a reações indesejadas, comprometendo a aplicação do sanitizante. Isso ocorre porque o ácido hipocloroso presente na solução reage rapidamente com a matéria orgânica das frutas e hortaliças, resultando na formação de subprodutos como trihalometanos, halo-cetonas, ácidos haloacéticos e cloropicrina. Esses subprodutos podem permanecer tanto no produto final quanto na água de sanitização descartada, representando riscos à saúde dos consumidores e ao meio ambiente (AHMED *et al.*, 2017; SHAHBAZ *et al.*, 2018).

Outro aspecto negativo é que o cloro pode causar irritação na pele, mucosas e vias respiratórias dos manipuladores de alimentos (ATALLA *et al.*, 2024; MADHAVI *et al.*, 2022). Devido a esses riscos, alguns países europeus, como Alemanha, Bélgica, Holanda e Suécia, proibiram o uso de compostos clorados na sanitização de produtos frescos (CHEN; HUNG, 2017; ZAMAN *et al.*, 2024). Diante dessas limitações associadas ao uso de compostos clorados, diversos métodos alternativos, tanto químicos quanto físicos, têm sido propostos. Essas abordagens visam estender a vida de prateleira dos alimentos, eliminar microrganismos indesejáveis, preservar as

propriedades nutricionais e sensoriais e, ao mesmo tempo, serem ambientalmente seguras.

Métodos químicos alternativos de sanitização

Ácidos orgânicos

Os ácidos orgânicos são compostos químicos amplamente presentes na natureza, constituindo componentes naturais de plantas e tecidos animais. Por exemplo, o ácido cítrico, conhecido por sua abundância em frutas cítricas como laranja e limão, também pode ser encontrado em outras frutas ácidas, como acerola e abacaxi (BRAJĚK; SMAOUI, 2021). Outros ácidos orgânicos, como o acético e o láctico, desempenham funções essenciais tanto na natureza quanto na indústria, sendo amplamente utilizados na indústria alimentícia como conservantes, antioxidantes, aromatizantes, acidulantes e reguladores de pH (DENG *et al.*, 2020; MEIRELES *et al.*, 2016).

Mesmo em concentrações moderadamente baixas, esses ácidos exibem efeitos inibitórios sobre o crescimento microbiano, sendo eficazes na preservação de alimentos ácidos e bebidas. Esses compostos são geralmente reconhecidos como seguros (GRAS) e destacam-se por sua atividade bactericida, atuando de forma rápida e eficaz contra um amplo espectro de bactérias. Além disso, mantém sua eficácia em uma ampla faixa de temperatura (KANG; KANG, 2016). Em comparação aos compostos clorados, esses agentes apresentam vantagens significativas quando utilizados como antimicrobianos, pois sua dissolução em moléculas orgânicas não gera resíduos tóxicos ou cancerígenos. Por isso, têm sido indicados para a aplicação em produtos minimamente processados e prontos para consumo (LEPAUS *et al.*, 2020; PELISSARI *et al.*, 2021, MONCIOSO *et al.*, 2021).

Entre os ácidos orgânicos propostos para sanitização, destacam-se o ácido acético e o ácido peracético, embora o ácido

lático também tenha sido amplamente estudado. O ácido acético, principal componente do vinagre, é um intermediário metabólico naturalmente produzido em frutas por meio da fermentação de açúcares e é amplamente utilizado como conservante e acidulante. Ele exerce um efeito tóxico sobre as células microbianas, principalmente devido à sua capacidade de reduzir o pH do meio (LUND *et al.*, 2020). Além disso, por ser lipofílico, o ácido acético consegue atravessar a membrana citoplasmática dos microrganismos, desestabilizar o pH intracelular e, conseqüentemente, induzir a morte celular. Essas propriedades conferem ao ácido acético uma atividade antimicrobiana significativa (CARPENTER; BROADBENT, 2009).

Quando combinado com peróxido de hidrogênio, o ácido acético forma o ácido peracético, um composto com elevado poder oxidante e ação antimicrobiana (ALVARENGA *et al.*, 2020; SHEN e ZHU, 2023). Esse composto mantém sua estabilidade e atividade biocida mesmo em condições de variação de temperatura e na presença de matéria orgânica (ALVARO *et al.*, 2009; ZOELLNER *et al.*, 2018). O efeito bactericida do ácido peracético ocorre principalmente pela liberação de oxigênio ativo, que provoca a ruptura das paredes celulares e interfere na função quimiosmótica das lipoproteínas da membrana citoplasmática. Por ser um composto de baixo peso molecular, ele é capaz de atravessar a membrana bacteriana e reagir com componentes celulares internos, causando danos às estruturas celulares e a liberação de substâncias intracelulares (BARBOSA *et al.*, 2016). Além disso, o ácido peracético é ambientalmente amigável, pois se decompõe em ácido acético biodegradável e átomos de oxigênio, que são facilmente assimilados pelo meio ambiente (ALVARO *et al.*, 2009).

O PAA pode ser usado diretamente como uma solução sanitizante para produtos frescos a 80 mg/L sem enxágue adicional com água (FDA, 2017a). Além disso, ele gera subprodutos tóxicos mínimos ou inexistentes na água do processo (LEE; HUANG, 2019).

De modo geral, os ácidos em sua forma não dissociada conseguem atravessar a membrana celular dos microrganismos. Quando

o pH intracelular é mais alto que o do meio externo, esses ácidos se dissociam e liberam prótons, acidificando o citoplasma (BRAJĚK; SMAOUI, 2021). Como consequência, a célula é forçada a expelir o excesso de prótons para manter o pH interno, o que exige um gasto energético considerável e interfere em atividades metabólicas essenciais, como o transporte de nutrientes e a força próton-motriz. Além disso, ocorre o comprometimento de funções metabólicas críticas, incluindo a síntese de proteínas, a inibição da produção de ATP e o aumento da pressão osmótica (BRAJĚK; SMAOUI, 2021; BURIN *et al.*, 2014).

No que diz respeito às desvantagens, esses ácidos podem alterar o sabor de alguns produtos e, dependendo da concentração aplicada e corroer os equipamentos de processamento (ÖLMEZ; KRETZSCHMAR, 2009). Além disso, esses compostos podem apresentar eficácia limitada na redução da carga microbiana na superfície de produtos frescos, devido à possibilidade de reações inespecíficas com o conteúdo orgânico das plantas. A ação dos sanitizantes também pode ser comprometida pela presença de matrizes de substâncias poliméricas extracelulares, produzidas por bactérias na superfície das plantas, e pelos atributos estruturais da superfície vegetal, como fendas, rachaduras e pequenas fissuras, somados à natureza hidrofóbica da cutícula cerosa (HUANG; NITIN, 2017). Para superar essas limitações, a combinação de ácidos orgânicos com tecnologias físicas tem sido explorada, visando aumentar a eficácia da sanitização em superfícies vegetais complexas.

Um estudo sobre a sanitização de folhas de betel demonstrou que uma concentração de 2% de ácido acético foi capaz de reduzir a população de patógenos em 4,0 log UFC/g (AHMED *et al.*, 2017). Em outro estudo, Burin *et al.* (2014) avaliaram o comportamento de *Salmonella* spp. sob condições de estresse ácido, utilizando ácido acético e ácido lático, e observaram que o ácido acético apresentou desempenho superior no controle e na redução desses microrganismos. No entanto, em outra pesquisa foi avaliada a eficiência de

sanitização em morangos, folhas de rúcula e pepino com ácido acético e ácido láctico a 1% e 2% e constatou-se que o ácido láctico, na concentração de 2%, foi mais eficaz na inativação de *Salmonella enterica* Enteritidis. Apesar disso, ambos os sanitizantes alternativos apresentaram eficiência similar ou superior à dos compostos clorados (LEPAUS *et al.*, 2020). Além disso, na sanitização de folhas de Centella asiática (acaricó), o ácido acético também demonstrou desempenho similar ou superior ao dos compostos clorados na redução de mesófilos aeróbios, fungos filamentosos e leveduras (ROSLI *et al.*, 2022).

Ao aplicar a lavagem com ácido peracético (80 mg/L) em mirtilos, Leblanc *et al.* (2021) observaram que o sanitizante promoveu uma inativação rápida e significativa do rotavírus bovino ($>6 \log_{10}$ após 1 minuto) e do norovírus ($>4 \log_{10}$ após 10 minutos). No entanto, o vírus da hepatite A foi menos afetado, com redução inferior a $3 \log_{10}$ após 20 minutos. Em outro estudo, realizado com folhas de alface, verificou-se que o ácido peracético (80 mg/L) apresentou desempenho similar ao dos compostos clorados na sanitização. Além disso, os autores constataram que a lavagem com cloro gerou quantidades significativas de trihalometanos, cloratos e cloritos, reforçando os riscos ambientais e à saúde associados ao uso desses compostos.

Esses resultados sugerem que a eficácia dos ácidos orgânicos pode variar de acordo com o tipo de alimento e o microrganismo-alvo, ressaltando a importância de ajustar a concentração e o método de aplicação para cada cenário específico. Além disso, evidenciam o potencial do ácido peracético como uma alternativa mais segura e eficaz em comparação aos compostos clorados, especialmente para alimentos consumidos crus que não passam por etapas subsequentes de redução microbiana, como vegetais folhosos e frutas frescas, onde a segurança microbiológica é crítica.

Peróxido de hidrogênio

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2), também conhecido como dióxido de hidrogênio, é um composto com atividade bacteriostática e bactericida que apresenta alto poder oxidante. O peróxido de hidrogênio é um líquido incolor e comercialmente disponível em solução aquosa em uma ampla faixa de concentração. Esse composto pode gerar espécies oxidantes, como íons superóxido e radicais hidroxila, que atacam componentes celulares essenciais, como lipídios de membrana e DNA, por meio da oxidação de grupos sulfidril e ligações duplas, levando à inativação da célula microbiana (ABDELSHAFY *et al.*, 2024; YOON; LEE, 2018). Por essa razão, é amplamente utilizado como agente esterilizante em ambientes e na descontaminação de utensílios. Devido à sua alta capacidade oxidante, o peróxido de hidrogênio pode ser aplicado na esterilização de frutas e legumes tanto na forma líquida quanto gasosa. Ele possui o selo GRAS e é considerado ecologicamente seguro, uma vez que sua decomposição gera oxigênio e água (ZAMAN *et al.*, 2024).

Apesar dessas vantagens, o uso do peróxido de hidrogênio ainda não é amplamente difundido para a conservação de alimentos. Sua eficiência antimicrobiana está diretamente relacionada à concentração utilizada e ao tipo de alimento tratado. Em um estudo que aplicou peróxido de hidrogênio (3%) na sanitização de diferentes alimentos frescos, Lepaus *et al.* (2020) observaram que esse sanitizante alternativo apresentou desempenho superior ao dos compostos clorados na redução de *Salmonella enterica* Enteritidis em pepinos e folhas de rúcula. No entanto, o mesmo resultado não foi observado nos morangos tratados, sugerindo que a eficácia do peróxido de hidrogênio pode variar de acordo com o tipo de alimento, possivelmente devido às diferenças nas características superficiais e nos tipos de interação entre o sanitizante e o alimento. A variação na eficácia pode estar relacionada à presença de cutículas cerosas em morangos, que dificultam a penetração do sanitizante, enquanto alimentos como pepinos e

folhas de rúcula possuem superfícies mais acessíveis. Por esse motivo, a combinação entre métodos pode favorecer o efeito deste agente.

Estudos futuros devem focar na otimização de sua aplicação, considerando fatores como a interação com diferentes superfícies de alimentos e a minimização de impactos nas propriedades sensoriais, para que o peróxido de hidrogênio possa ser adotado de forma mais ampla e eficaz na conservação de alimentos frescos.

Óleos essenciais

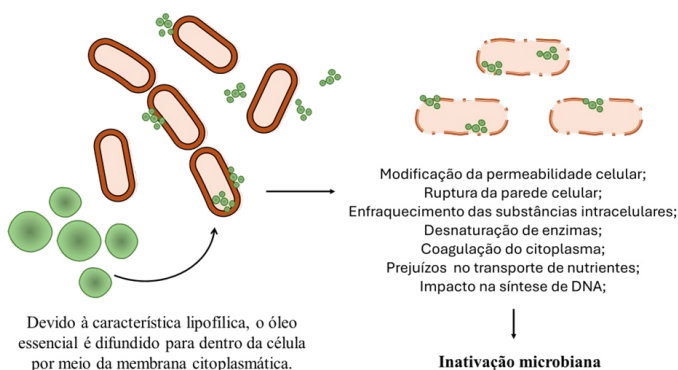
Óleos essenciais (OEs) são substâncias naturais altamente voláteis e aromáticas, encontradas em diversas partes das plantas, como folhas, flores, cascas, raízes, sementes e frutos. Eles são produzidos como mecanismo de defesa das células vegetais contra patógenos, pragas e herbívoros. Sua composição é formada por uma complexa mistura de moléculas orgânicas, principalmente terpenos, fenóis e compostos aromáticos, que conferem aos óleos essenciais um aroma intenso e propriedades biológicas únicas (MANI-LÓPEZ *et al.*, 2018; LIMA e SOUZA, 2020; PIZZO *et al.*, 2023).

O uso desses compostos na sanitização de alimentos frescos tem ganhado destaque como uma alternativa natural e sustentável aos sanitizantes químicos convencionais, como os compostos clorados. Os OEs de tomilho, orégano, entre outros, possuem propriedades antioxidantes, antimicrobianas e antifúngicas, que os tornam eficazes no controle de patógenos e na extensão da vida útil dos alimentos. O mecanismo de ação dos OEs ainda não está completamente elucidado na literatura, mas sugere-se que está relacionado à sua natureza hidrofóbica e à capacidade de interagir com a camada lipídica da membrana celular dos microrganismos (Figura 1). Essa interação aumenta a permeabilidade da membrana, permitindo o extravasamento de íons e outros componentes celulares, o que leva à morte celular (MANI-LÓPEZ *et al.*, 2018). Por serem substâncias hidrofóbicas, é necessário utilizar emulsificantes ou técnicas de encapsulação

nas soluções sanitizantes para garantir uma dispersão adequada no meio líquido (PEREZ-LEWIS *et al.*, 2021; YOON; LEE, 2018).

Devido ao efeito antimicrobiano desses compostos, diversos estudos têm investigado a aplicação de uma ampla variedade de OEs na etapa de sanitização de diferentes frutas e hortaliças. Esses compostos são eficientes na sanitização de soluções para vegetais frescos, sendo que sua capacidade antimicrobiana está associada a principalmente terpenos como timol, carvacrol e eugenol (KANG, 2022; PIZZO *et al.*, 2023). Lima e Souza (2020) realizaram análise quantitativa de pesquisas que utilizaram óleos essenciais na etapa de sanitização de frutas e hortaliças. Os autores constataram que os OEs são eficazes para reduzir a população microbiana presente nesses alimentos seja na condição de inóculo artificial, seja de microbiota natural, sendo em algumas ocasiões mais eficientes do que substâncias comumente usadas como sanitizantes. No entanto, em muitas aplicações, concentrações mais elevadas de OEs podem ser necessárias para alcançar a mesma redução microbiana observada em testes *in vitro*. Esse aumento na concentração pode alterar significativamente as características sensoriais (sabor e aroma) do produto, representando um dos principais desafios para a aplicação desse método (DENG *et al.*, 2020).

Figura 1: Mecanismo de inativação microbiana dos óleos essenciais



Fonte: Elaborado pelos autores.

O óleo essencial de tomilho (0,2%) foi testado como sanitizante em folhas de rúcula. Embora a análise *in vitro* tenha demonstrado forte atividade antimicrobiana, tanto o OE quanto o hipoclorito de sódio (120 mg/L de cloro ativo) não foram eficazes na eliminação de *Escherichia coli* inoculada nos experimentos *in situ*. Entretanto, a taxa de crescimento da população de *E. coli* ao longo do tempo foi menor nas amostras de rúcula tratadas com a solução à base de OE, indicando um efeito positivo do óleo essencial (VELOSO *et al.*, 2019). O óleo essencial de cravo (0,5%) também foi avaliado quanto à eficiência na redução da microbiota natural contaminante em maçãs, demonstrando maior eficácia em comparação ao composto clorado (MONCIOSO *et al.*, 2021).

De acordo com Santos *et al.* (2025), apesar das características positivas do uso de óleos essenciais e principais compostos isolados, sua aplicação na etapa de sanitização pode ser dificultada pela instabilidade química e por processos de degradação em casos de exposição ao calor e à luz. Assim, pesquisas têm indicado que o processo de emulsificação pode proteger os compostos ativos dos óleos essenciais ao retardar a volatilização, além de propiciar aumento de solubilidade em água (DUNN *et al.*, 2019; HE *et al.*, 2021; BODEA *et al.*, 2023; PECCINI *et al.*, 2024; SANTOS *et al.*, 2025).

Kang e Song (2018) avaliaram o efeito inibitório de nanoemulsões de óleo essencial de plantas contra *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 e *Salmonella* Typhimurium em folhas de mostarda. Folhas de mostarda vermelha inoculadas com os patógenos foram tratadas apenas com OEs, surfactantes (Tween 80 e cloreto de cetilpiridínio (CPC)) e nanoemulsões formuladas com OEs (0,02%) e combinadas com os surfactantes (0,002%). As reduções em todos os patógenos após o tratamento com nanoemulsões contendo OEs e CPC promoveram maiores reduções do que as promovidas pelo hipoclorito de sódio a 0,02%. Além disso, o tratamento de nanoemulsão não afetou as qualidades sensoriais da mostarda vermelha durante o armazenamento.

Dávila-Rodríguez *et al.* (2019) avaliaram nanoemulsões de OEs em aipo fresco e observaram que nanoemulsões de OE de orégano foram as mais eficazes na inibição de *E. coli* e *L. monocytogenes* quando comparadas com os EOs não encapsulados. Além disso, em menos de 60 min foram obtidas reduções de 5 log da contaminação presente nas amostras.

Dunn *et al.* (2019) avaliaram a aplicação de uma emulsão de óleo essencial de broto de cravo (0,2 e 0,5%) e óleo essencial de tomilho (0,2 e 0,5%) como sanitizante em pimentões inoculados com *Salmonella* e constataram que os tratamentos com emulsão a 0,2 e 0,5% de óleo de tomilho e 0,5% de óleo essencial de broto de cravo foram os menos afetados por carga de matéria orgânica e reduziram significativamente a contaminação por *Salmonella*.

Bodea *et al.* (2023) avaliaram soluções de sanitização baseadas em nanoemulsões de OE de orégano e alecrim para a descontaminação de *E. coli* O157: H7 em tomates-cereja. Quando aplicada a maior concentração de nanoemulsão de OE de orégano (10%) houve efeito de inativação equivalente à solução comercial de cloro, promovendo redução de aproximadamente 3,5 log UFC.

Os resultados sugerem que os OEs são eficazes na redução da contaminação em alimentos frescos. No entanto, seu uso deve ser otimizado, com ajustes na concentração e no tempo de imersão durante a sanitização, para garantir a eficácia sem comprometer as características sensoriais dos alimentos. Além disso, estudos futuros podem explorar a combinação desses compostos com outras tecnologias, para melhorar sua dispersão e eficácia, minimizando o impacto nas características sensoriais dos alimentos.

Extratos de plantas

Atualmente, há um crescente interesse pela utilização de ingredientes naturais no setor alimentício, impulsionado pela preocupação

dos consumidores com os impactos na saúde e no meio ambiente. As plantas são compostas por uma variedade de substâncias, como compostos fenólicos, terpenoides, glucosinolatos e outros metabólitos secundários, produzidos nos tecidos vegetais e desempenham funções essenciais na proteção contra agentes externos, como radiação ultravioleta, patógenos, parasitas e insetos (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021). A composição e as características dos extratos dessas plantas estão relacionadas ao método de extração, solvente, localização geográfica e parte da planta. De acordo com a Food and Drug Administration, 100 extratos de plantas são considerados GRAS (OULAHAL; DEGRAEVE, 2022; VIEIRA *et al.*, 2022).

Nesse contexto, os compostos bioativos naturais representam uma oportunidade promissora para exploração, uma vez que são facilmente encontrados em diversas fontes, como frutas, legumes, cereais, especiarias, flores, raízes, sementes e ervas, além de estarem presentes em subprodutos gerados pelo processamento desses alimentos. Seus extratos podem conter uma variedade de compostos bioativos com distintas propriedades antimicrobianas, antioxidantes e outras funcionalidades benéficas. Os antimicrobianos de origem vegetal atuam no funcionamento da célula microbiana de diferentes formas, causando perturbação das membranas celulares e da comunicação celular, interferência na síntese de ácidos nucleicos e o comprometimento do metabolismo, o que afeta a sobrevivência do microrganismo e leva à sua morte (CHEN; LAN; XIE, 2024; LIMA *et al.*, 2019).

O extrato etanólico de *Cyclopia intermedia*, popularmente conhecida como *honeybush*, na concentração de 6 mg/mL foi testado como sanitizante em folhas de acelga. O extrato inativou eficazmente *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli* O157:H7, principalmente por causar danos às membranas celulares. Além disso, seu efeito antimicrobiano foi comparável ao do hipoclorito de sódio (KANG; SONG, 2021). Em outro estudo, vegetais frescos (acelga vermelha, beterraba, chicória e folhas de mostarda vermelha) foram tratados com extrato de bagaço de romã (7 mg/mL). Após o tratamento, as reduções na população de

L. monocytogenes nos quatro vegetais foram maiores do que as observadas com o uso de hipoclorito de sódio (KANG; SONG, 2017). Adicionalmente, folhas de louro indonésio (*Syzygium polyanthum* L.) foram utilizadas para a obtenção de extrato etanólico, que foi aplicado como sanitizante em uvas em concentrações de 0,05% a 5%. O extrato demonstrou boas taxas de inibição do crescimento de patógenos, incluindo *Escherichia coli* O157: H7 e *Staphylococcus aureus*, especialmente em concentrações mais elevadas e mesmo após 5 minutos de tratamento (o menor tempo testado) (RAMLI *et al.*, 2017).

Embora ainda não seja um tema amplamente explorado na literatura, o uso de extratos vegetais deve ser considerado como uma alternativa natural promissora para a preservação de alimentos. Os resultados demonstram que, mesmo em concentrações relativamente baixas, os extratos fenólicos são capazes de reduzir significativamente as contagens microbianas, incluindo patógenos de interesse alimentar. Estudos futuros são necessários para otimizar as concentrações e métodos de obtenção e aplicação desses extratos, visando maximizar sua eficácia antimicrobiana sem comprometer as características sensoriais dos alimentos

Métodos físicos alternativos de sanitização

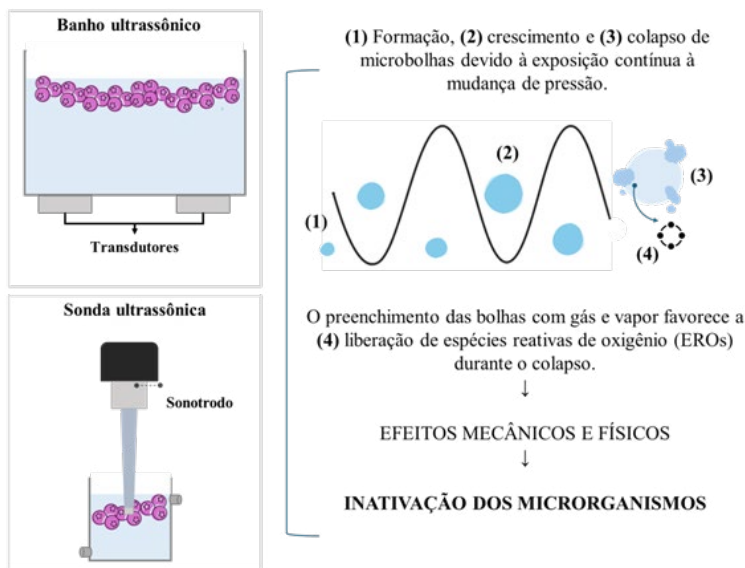
Ultrassom

O ultrassom é uma tecnologia não térmica que utiliza ondas sonoras com frequência superior à capacidade de audição humana (> 20 kHz). Essas ondas sonoras são emitidas com intensidade e amplitude específicas, dependendo da frequência operacional. As ondas ultrassônicas (geradas por frequências de 20 kHz ou mais) produzem bolhas de gás em meio líquido, que, ao colapsar, geram altas temperaturas e pressões localizadas (ZHU *et al.*, 2024).

A aplicação do ultrassom requer a presença de um meio líquido, podendo ser realizada por meio de banhos ultrassônicos ou sondas de imersão (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022). O mecanismo básico do ultrassom é o efeito de cavitação acústica, um fenômeno que envolve a formação, crescimento e colapso de microbolhas (Figura 2).

Durante a cavitação acústica, gerada por altas potências, formam-se ondas longitudinais que criam áreas alternadas de compressão e expansão. Na fase de expansão, as microbolhas em meio líquido crescem devido à redução da pressão local, enquanto na fase de compressão, a área superficial das bolhas diminui. Esses movimentos alternados podem levar ao colapso das bolhas, gerando regiões localizadas com temperaturas extremamente altas (até 5000 °C) e pressões elevadas (até 1000 atm) (KHAN *et al.*, 2022).

Figura 2: Esquema dos tipos de ultrassom e efeito da cavitação acústica no meio líquido



Fonte: Elaborado pelos autores.

O colapso de uma bolha de cavitação gera um jato de líquido impulsionado a alta velocidade a partir do centro da bolha, o que pode causar corrosão em superfícies sólidas. Esse fenômeno, conhecido como microtransmissão, pode induzir a erosão das paredes celulares, resultando na inativação de microrganismos. Além disso, a implosão da bolha durante a cavitação promove a formação de radicais livres, que possuem alto poder oxidativo e causam danos ao DNA dos microrganismos, provocando rupturas e fragmentação ao longo de sua estrutura. Esse processo é denominado sonólise, em que as altas temperaturas e pressões geradas no interior da bolha são responsáveis pela formação de átomos de hidrogênio e radicais hidroxila (GUO *et al.*, 2021; KHAN *et al.*, 2022).

A utilização do ultrassom em alimentos apresenta diversas vantagens, principalmente por ser um processo não térmico que reduz a carga microbiana e aumenta o prazo de conservação, especialmente em alimentos com atributos sensoriais, nutricionais e funcionais sensíveis ao calor. A eficácia do ultrassom depende de fatores críticos de processamento, como a natureza das ondas ultrassônicas, o tempo de exposição, o tipo de microrganismo, o volume de alimentos processados, a composição dos alimentos e a temperatura do processamento. Além disso, sua ação pode ser potencializada quando combinado com agentes químicos de sanitização, como ácidos orgânicos, óleos essenciais e peróxido de hidrogênio, descritos anteriormente neste capítulo (ABDELSHAFY *et al.*, 2024; DUAN *et al.*, 2024; HE *et al.*, 2021; IRAZOQUI *et al.*, 2024; LUO *et al.*, 2024; PELISSARI *et al.*, 2021). O efeito mecânico do ultrassom favorece a maior penetração dos agentes químicos nas células microbianas, enquanto a ação química reduz o tempo de processamento necessário para inativar os microrganismos.

Mais informações sobre a aplicação deste método serão detalhadas no capítulo 3.

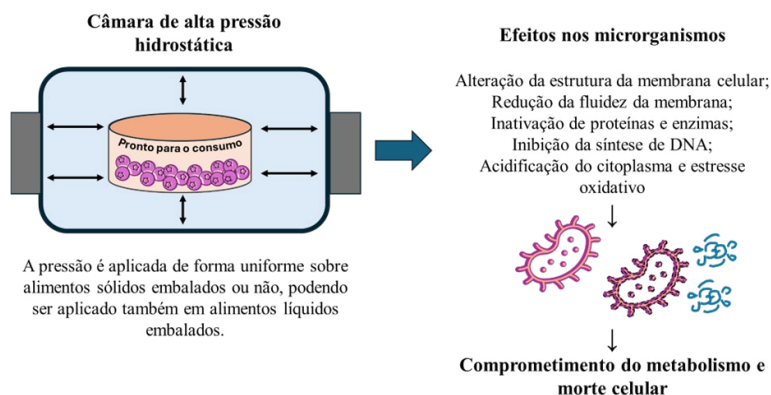
Alta pressão hidrostática

A alta pressão hidrostática, também conhecida como processamento por alta pressão (HPP, do inglês *High Pressure Processing*), é uma tecnologia não térmica amplamente utilizada na sanitização e conservação de frutas e vegetais frescos. A técnica consiste na aplicação de pressões elevadas (geralmente entre 50 e 1000 MPa) sobre os alimentos, utilizando um meio líquido (normalmente água) para transmitir a pressão de forma uniforme. Os alimentos são geralmente embalados a vácuo e colocados em uma câmara, que é então inserida no equipamento de alta pressão.

Entre as vantagens da alta pressão hidrostática, destacam-se, a natureza não térmica do processo, a possibilidade de aplicação em alimentos já embalados e a capacidade de inativar microrganismos patogênicos e deteriorantes, como bactérias, leveduras, fungos filamentosos e vírus, sem a necessidade de calor ou aditivos químicos (PINELA; FERREIRA, 2017).

Os mecanismos de ação da alta pressão hidrostática são diversos e incluem a alteração da estrutura da membrana celular, o que reduz a fluidez da membrana e inativa as proteínas associadas a ela. Além disso, a tecnologia modifica a permeabilidade e a funcionalidade celular, inibe a síntese de DNA, induz a desnaturação de proteínas e a inativação de enzimas, além de causar acidificação do citoplasma e estresse oxidativo. Essas alterações comprometem o metabolismo celular, levando à morte da célula (Figura 3). No entanto, esporos e alguns microrganismos podem apresentar maior resistência à alta pressão, uma vez que algumas células são capazes de reparar danos subletais induzidos pela pressão, permitindo sua proliferação após o tratamento (DENG *et al.*, 2020).

Figura 3: Esquema de alimento tratado por alta pressão hidrostática e efeitos nas células microbianas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por exemplo, o efeito da alta pressão hidrostática (HPP, 400 MPa/1 min) contra *Listeria monocytogenes* foi testado em saladas prontas para consumo. A condição foi capaz de reduzir a contagem do patógeno entre 1,5 e 4,0 log UFC/g após o tratamento. No entanto, essas bactérias foram capazes de se recuperar e proliferar durante o armazenamento do alimento (STRATAKOS *et al.*, 2016). Em outro estudo, a eficiência da HPP foi avaliada na descontaminação de hortaliças em conserva, comparando-a ao tratamento térmico. Observou-se que, tanto nas amostras tratadas com HPP quanto nas tratadas termicamente, o número de microrganismos diminuiu à medida que o tempo de tratamento aumentou. Após a aplicação de HPP (400 MPa/20 min) e do tratamento térmico (90 °C/15 min), a contagem microbiana nos vegetais foi semelhante (YANG *et al.*, 2022). Já no caso de saladas de frutas submetidas ao tratamento com HPP, as amostras mantiveram-se mais estáveis do ponto de vista microbiológico em comparação às amostras não processadas. A HPP reduziu quase 4 unidades logarítmicas na contagem de mesófilos aeróbios totais, além de leveduras e fungos filamentosos (LOPES *et al.*, 2024).

Esses resultados destacam que a eficácia da HPP pode variar conforme o tipo de alimento e o microrganismo-alvo, mostrando-se especialmente promissora em produtos mistos embalados, como saladas e vegetais prontos para o consumo. Para superar a resistência de esporos e microrganismos, a alta pressão hidrostática pode ser associada a tratamentos térmicos moderados ou a agentes químicos, como ácidos orgânicos, potencializando a eficácia do processo.

Radiação ultravioleta (UV)

A irradiação é um processo físico que envolve a emissão e propagação de energia por meio de ondas ou partículas com energia cinética. Quando aplicada aos alimentos, constitui um método de preservação físico, não térmico e não químico, no qual os produtos são expostos a fontes de radiação ionizante ou não ionizante. A classificação entre esses tipos de radiação baseia-se na capacidade de ionizar ou não os átomos, ou moléculas do material tratado (BISHT *et al.*, 2021).

A radiação ultravioleta (UV) é um tipo de radiação não ionizante utilizada na descontaminação de superfícies devido ao seu baixo poder de penetração. No processamento de alimentos, a aplicação da UV ocorre em comprimentos de onda entre 100 e 400 nm, espectro que se subdivide em quatro faixas: UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm), UV-C (200–280 nm) e UV-V (100–200 nm) (BISHT *et al.*, 2021). Proteínas que contêm aminoácidos aromáticos e ácidos nucleicos absorvem luz nesses comprimentos de onda, tornando-a radiação UV um agente germicida eficaz para alimentos. Em 2000, a FDA declarou que o tratamento com UV é seguro e capaz de eliminar microrganismos patogênicos (SRUTHI *et al.*, 2023).

Um estudo avaliou a eficiência da radiação UV-C em saladas embaladas e prontas para o consumo. Foram aplicadas quatro doses de UV-C (controle: 0 kJ/m², baixa: 1 kJ/m², média: 4 kJ/m² e alta: 7 kJ/m²) e observou-se que a dose de 4 kJ/m² foi a mais eficaz, aumentando em seis vezes a vida útil do produto (PEREZ *et al.*, 2024).

Assim como em outros métodos de conservação, a eficiência do tratamento por UV depende de diversos fatores, incluindo o tempo de exposição, o comprimento de onda, a dose e a fonte de luz utilizada. Estudos adicionais são necessários para otimizar os parâmetros de aplicação e explorar combinações com outras tecnologias para potencializar seus efeitos na segurança e qualidade dos alimentos.

Métodos Combinados

A Tecnologia de Barreiras, também conhecida como Tecnologia de Obstáculos, é um conceito amplamente utilizado na ciência e tecnologia de alimentos. Consiste na aplicação combinada de diferentes métodos para controlar a carga microbiana, prolongar a vida útil e garantir a segurança dos alimentos. A premissa central é que a sinergia entre esses métodos resulta em um efeito inibitório mais eficaz do que o uso isolado de cada técnica (CHEN, 2022; YUAN *et al.*, 2021). Entre os benefícios dessa abordagem, destaca-se a possibilidade de reduzir a intensidade de cada tratamento individual, minimizando impactos negativos sobre as propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos.

No contexto da sanitização de frutas e hortaliças, a combinação de métodos químicos pode potencializar a redução de microrganismos. Isso ocorre porque cada agente químico atua em diferentes alvos celulares, promovendo a degradação da parede celular, a desnaturação de proteínas ou a interferência no metabolismo microbiano. Além disso, a associação de métodos químicos com técnicas físicas, como ultrassom e alta pressão, pode aumentar ainda mais a eficiência da sanitização, pois os métodos físicos favorecem a penetração dos agentes químicos na superfície dos alimentos, onde os microrganismos frequentemente aderem (YUAN *et al.*, 2021).

Por exemplo, a aplicação de ultrassom (US) a 40 kHz e 500 W, combinado com ácido peracético (80 mg/L), na sanitização de saladas

minimamente processadas, aumentou a eficiência do agente químico (MARQUES *et al.*, 2019). De forma semelhante, a combinação de US com óleo essencial (OE) de manjerição apresentou efeitos antibacterianos sinérgicos contra *Shigella flexneri* inoculada em repolho, causando danos severos à integridade da membrana celular e à morfologia da bactéria (DUAN *et al.*, 2024). Ainda, He *et al.* (2021) observaram que a aplicação do ultrassom combinado a nanoemulsões de óleo essencial de tomilho melhorou o efeito de descontaminação contra *Escherichia coli* O157: H7 em tomates do tipo cereja, alcançando efeitos sinérgicos. Assim, o tratamento combinado reduziu as populações de *E. coli* em 4,49–6,72 log UFC/g na superfície dos tomates do tipo cereja e atingiu 4,48–6,94 log UFC/amostra de inativação total. Além disso, os autores também destacaram que esses tratamentos foram eficazes na redução da presença de bactérias em águas residuais, o que possibilita a redução da ocorrência da contaminação cruzada.

Impacto na qualidade dos alimentos

Além de avaliar a eficiência na redução da contaminação microbiana, é preciso verificar quais os possíveis impactos dos métodos alternativos de sanitização nas características dos alimentos. Assim, a análise do impacto dos tratamentos de sanitização na qualidade sensorial e nutricional dos alimentos é essencial, especialmente no caso de frutas e hortaliças prontos para o consumo, nos quais aparência, textura, sabor e valor nutricional são determinantes para a aceitação do consumidor e a vida útil do produto. Métodos de sanitização agressivos podem levar à degradação de nutrientes sensíveis, como vitaminas e antioxidantes. Portanto, a escolha do método deve priorizar a minimização dessas perdas, garantindo a manutenção da qualidade do alimento.

Em um estudo com folhas de acaricó, Rosli *et al.* (2022) observaram que a aplicação de diferentes sanitizantes não afetou

significativamente a firmeza, a atividade de água, a umidade e os sólidos solúveis totais em comparação com amostras lavadas apenas com água corrente. No entanto, o tratamento com ácido acético provocou alterações na cor, reduziu o pH e diminuiu o conteúdo de clorofila das folhas, possivelmente devido à acidez do sanitizante. Apesar de não impactar o teor de compostos fenólicos totais, esse tratamento recebeu pontuações mais baixas na avaliação sensorial dos atributos analisados.

Coswosck *et al.* (2021) investigaram os efeitos de diferentes sanitizantes, incluindo ácidos orgânicos, peróxido de hidrogênio e compostos clorados, na sanitização de morangos, pepinos e rúcula. Os resultados variaram conforme o alimento testado. Para os parâmetros físico-químicos, como pH, acidez e sólidos solúveis, os morangos foram os menos afetados, enquanto as folhas de rúcula apresentaram maior sensibilidade. Já o conteúdo de compostos fenólicos e capacidade antioxidante não foram comprometidos, exceto pelo tratamento com peróxido de hidrogênio em rúcula, o qual resultou em uma redução significativa da capacidade antioxidante.

Ao aplicar diferentes métodos de conservação em saladas minimamente processadas (compostos clorados, ultrassom, ácido peracético e sachês contendo óleo essencial), Marques *et al.* (2019) relataram que, de modo geral, não houve prejuízos significativos nos parâmetros sensoriais, como odor, cor e intenção de compra. Resultados semelhantes foram observados em folhas de repolho tratadas com ultrassom e óleo essencial de tomilho, que mantiveram seus atributos de qualidade e boa aceitação sensorial (DUAN *et al.*, 2024). Além disso, a sanitização de rúcula com óleo essencial de tomilho não alterou os parâmetros de cor e, durante o armazenamento, contribuiu para sua preservação, possivelmente devido à ação antioxidante dos compostos presentes, que retardam a oxidação (VELOSO *et al.*, 2019). Entretanto, em um estudo com a aplicação de emulsão de óleo essencial de tomilho em alface, observou-se redução da firmeza e do teor

de clorofila das folhas, dependendo da concentração utilizada (SANTOS *et al.*, 2025).

Na sanitização de maçãs com soluções de ácido cítrico, óleo essencial de cravo e sua combinação, Moncioso *et al.* (2021) não detectaram alterações no pH, na acidez total ou nos sólidos solúveis das amostras. Amostras de acelga tratadas com extrato etanólico de honeybush (*Cyclopia intermedia*) a 6 mg/mL também não apresentaram alterações na cor e textura, demonstrando a eficácia do tratamento na preservação de parâmetros de qualidade (KANG; SONG, 2021). Da mesma forma, acelga vermelha, beterraba, chicória e folhas de mostarda vermelha sanitizadas com extrato de bagaço de romã (7 mg/mL) não apresentaram alterações na cor superficial (KANG; SONG, 2017). Ramli *et al.* (2017) descreveram resultados positivos ao utilizar extrato etanólico de folhas de louro indonésio (*Syzygium polyanthum* L.) na sanitização de uvas, sem diferenças estatísticas nos atributos sensoriais avaliados.

No caso de hortaliças em conserva processados por alta pressão hidrostática (HHP) mantiveram suas propriedades qualitativas. Esse tratamento preservou melhor a textura quando comparado ao processamento térmico, resultando em amostras com melhor dureza, elasticidade e teor de umidade. Além disso, a HHP reduziu significativamente o grau de esterificação da pectina, sem comprometer a estrutura do vegetal (YANG *et al.*, 2022). Lopes *et al.* (2024) relataram que a aplicação de HPP em salada de frutas resultou em um aumento significativo do escurecimento das amostras, efeito atenuado com o uso de ácido ascórbico. No entanto, a atividade antioxidante não apresentou diferenças significativas ao longo dos 35 dias de armazenamento.

Os efeitos dos tratamentos de conservação estão diretamente ligados às condições de processamento, como intensidade, tempo e temperatura. Por exemplo, na aplicação de radiação UV-C em saladas prontas para o consumo, Perez *et al.* (2024) observaram que a dose intermediária testada (4 kJ/m²) resultou na menor perda de polifenóis totais e melhor preservação da capacidade antioxidante. Esse efeito

foi atribuído à redução da atividade da enzima polifenol-oxidase, responsável pelo escurecimento e deterioração de vegetais.

Diante dos estudos apresentados, fica evidente que a escolha do método de sanitização deve considerar não apenas a eficiência microbiológica, mas também os impactos na qualidade sensorial e nutricional dos alimentos. Métodos menos agressivos ou combinados de forma estratégica podem permitir a segurança microbiológica aliada a menores perdas e preservação das características desejáveis, propiciando uma maior aceitação pelo consumidor. Além disso, novas pesquisas têm explorado combinações de técnicas químicas, físicas e biológicas para otimizar a conservação de vegetais minimamente processados, visando maior segurança microbiológica, vida útil estendida e manutenção das propriedades nutricionais.

Considerações finais

Os métodos alternativos de sanitização de frutas e hortaliças, como o uso de ácidos orgânicos, óleos essenciais, extratos de plantas, ultrassom e alta pressão hidrostática, representam avanços significativos na busca por estratégias que possam substituir os compostos clorados de forma mais segura, sustentável e eficaz. Essas abordagens atendem à crescente demanda por alimentos minimamente processados, com maior vida útil e qualidade nutricional, além de reduzirem o uso de produtos químicos sintéticos. No entanto, sua implementação em escala industrial requer uma análise cuidadosa que inclua diversos fatores.

Tratando-se de métodos físicos, os custos operacionais e de investimento inicial podem ser elevados, especialmente para pequenas e médias empresas. Por outro lado, o uso de ácidos orgânicos e extratos vegetais tende a ser mais acessível, mas pode exigir ajustes nos parâmetros de processo, como concentração e tempo de exposição, para garantir eficácia.

A tendência global por alimentos mais naturais e sustentáveis impulsiona cada vez mais a adoção de métodos alternativos de sanitização. Novas abordagens, como a combinação de métodos parece ser promissora para este campo. Entre os principais desafios estão a padronização dos processos, a garantia de eficácia em diferentes tipos de frutas e hortaliças e a superação de barreiras econômicas e tecnológicas. Por outro lado, há oportunidades significativas para pesquisas que explorem sinergias entre métodos, o desenvolvimento de novos compostos naturais com ação antimicrobiana e a avaliação do impacto dessas tecnologias na qualidade sensorial e nutricional dos alimentos. Espera-se que, com o avanço da pesquisa e a redução de custos, tecnologias alternativas possam estar mais acessíveis para serem aplicadas em larga escala.

Referências

- ABDELSHAIFY, A. M. *et al.* Hydrogen peroxide from traditional sanitizer to promising disinfection agent in food industry. **Food Reviews International**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 658-690, 2024.
- AHMED, S. *et al.* Effectiveness of non-chlorine sanitizers in improving the safety and quality of fresh betel leaf. **LWT**, [s. l.], v. 78, p. 77-81, maio 2017.
- ALBUQUERQUE, B. R. *et al.* Phenolic compounds: current industrial applications, limitations and future challenges. **Food & Function**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 14-29, 2021.
- ALVARENGA, P. D.; VASCONCELOS, C. M.; SÃO JOSÉ, J. F. B. Application of ultrasound combined with acetic acid and peracetic acid: microbiological and physicochemical quality of strawberries. **Molecules**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 16, 2020.
- ALVARO, J. E. *et al.* Effects of peracetic acid disinfectant on the post-harvest of some fresh vegetables. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 95, n. 1, p. 11-15, nov. 2009.

- ATALLA, A. *et al.* Trends in chlorine and chloramine gas exposures reported to United States poison centers. **Clinical Toxicology**, [s. l.], v. 62, n. 9, p. 589-595, 12 set. 2024.
- BALAKRISHNA, A. K.; WAZED, M. A.; FARID, M. A review on the effect of high pressure processing (HPP) on gelatinization and infusion of nutrients. **Molecules**, [s. l.], v. 25, n. 10, p. 2369, 20 maio 2020.
- BARBOSA, J. *et al.* Removal of Escherichia coli in boning knives with different sanitizers. **LWT – Food Science and Technology**, [s. l.], v. 71, p. 309-315, set. 2016.
- BHATIA, V. *et al.* Microbial risks associated with Ready-To-Eat Fresh Produce (RTEFP) – a focus on temperate climatic conditions. **Postharvest Biology and Technology**, [s. l.], v. 213, p. 112924, jul. 2024.
- BISHT, B. *et al.* Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], 2021.
- BLAND, R. *et al.* Probing antimicrobial resistance and sanitizer tolerance themes and their implications for the food industry through the Listeria monocytogenes lens. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 1777-1802, 24 mar. 2022.
- BODEA, I. M. *et al.* Washing solutions containing nanoemulsified essential oils as a potential substitute of commercial washes for the decontamination of Escherichia coli O157:H7 on cherry tomatoes. **LWT**, [s. l.], v. 190, p. 115549, 2023.
- BRAJĚK, O. B.; SMAOUI, S. Chemistry, safety, and challenges of the use of organic acids and their derivative salts in meat preservation. **Journal of Food Quality**, [s. l.], v. 2021, p. 1-20, 2021.
- BURIN, R. C. K.; SILVA, A.; NERO, L. A. Influence of lactic acid and acetic acid on Salmonella spp. growth and expression of acid tolerance-related genes. **Food Research International**, [s. l.], v. 64, p. 726-732, out. 2014.

- CARPENTER, C. E.; BROADBENT, J. R. External concentration of organic acid anions and pH: key independent variables for studying how organic acids inhibit growth of bacteria in mildly acidic foods. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 74, n. 1, 21 jan. 2009.
- CHEN, X.; HUNG, Y.-C. Effects of organic load, sanitizer pH and initial chlorine concentration of chlorine-based sanitizers on chlorine demand of fresh produce wash waters. **Food Control**, [s. l.], v. 77, p. 96-101, jul. 2017.
- CHEN, X.; LAN, W.; XIE, J. Natural phenolic compounds: antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 440, p. 138198, maio 2024.
- CHEN, Z. Application of chlorine dioxide-based hurdle technology to improve microbial food safety—a review. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], v. 379, p. 109848, out. 2022.
- CHINCHKAR, A. V. *et al.* Potential sanitizers and disinfectants for fresh fruits and vegetables: a comprehensive review. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 46, n. 10, 14 out. 2022.
- COSWOSCK, K. H. C. *et al.* Impact of alternative sanitizers on the physicochemical quality, chlorophyll content and bioactive compounds of fresh vegetables. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 41, n. 2, 2021.
- DENG, L.-Z. *et al.* Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 60, n. 15, p. 2481-2508, 21 ago. 2020.
- DUAN, L. *et al.* The inactivation of *Shigella flexneri* by synergistic effect of ultrasound combined with basil essential oil nanoemulsion and application in cabbage cleaning. **Food Control**, [s. l.], v. 156, p. 110142, fev. 2024.

- DUNN, L. L. *et al.* Essential oil emulsions as postharvest sanitizers to mitigate Salmonella cross-contamination on peppers. **Journal of Food Protection**, [s. l.], v. 82, n. 1, p. 159-163, 2019.
- GIL, M. I. *et al.* Pre-and postharvest preventive measures and intervention strategies to control microbial food safety hazards of fresh leafy vegetables. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 453-468, 21 mar. 2015.
- GUO, Y. *et al.* Ultrasonication and thermosonication blanching treatments of carrot at varying frequencies: effects on peroxidase inactivation mechanisms and quality characterization evaluation. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 343, p. 128524, maio 2021.
- HE, Q. *et al.* Ultrasound improves the decontamination effect of thyme essential oil nanoemulsions against Escherichia coli O157:H7 on cherry tomatoes. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], v. 337, p. 108936, 2021.
- HUANG, K.; NITIN, N. Enhanced removal of Escherichia coli O157:H7 and Listeria innocua from fresh lettuce leaves using surfactants during simulated washing. **Food Control**, [s. l.], v. 79, p. 207-217, set. 2017.
- IRAZOQUI, M. *et al.* Combined peracetic acid: power ultrasound disinfection process enhances bioactive compounds and preserves quality attributes of fresh-cut lettuce (cv. Vera). **Discover Food**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 14, 29 fev. 2024.
- KANG, J.-H. Understanding inactivation of Listeria monocytogenes and Escherichia coli O157:H7 inoculated on romaine lettuce by emulsified thyme essential oil. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 105, p. 104013, 2022.
- KANG, J.-H.; SONG, K. B. Antimicrobial activity of honeybush (Cyclopia intermedia) ethanol extract against foodborne pathogens and its application in washing fresh-cut Swiss chard. **Food Control**, [s. l.], v. 121, p. 107674, 2021.
- KANG, J.-H.; SONG, K. B. Inhibitory effect of plant essential oil nanoemulsions against Listeria monocytogenes, Escherichia coli

- O157:H7, and Salmonella Typhimurium on red mustard leaves. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 45, p. 447-454, 2018.
- KANG, J.-H.; SONG, K. B. Inhibitory effect of pomegranate (*Punica granatum*) pomace extract as a washing agent on the inactivation of *Listeria monocytogenes* inoculated on fresh produce. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 2295-2302, 2017.
- KANG, J.-W.; KANG, D.-H. Enhanced antimicrobial effect of organic acid washing against foodborne pathogens on broccoli by vacuum impregnation. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], v. 217, p. 85-93, jan. 2016.
- KHAN, S. A. *et al.* High intensity ultrasound processing in liquid foods. **Food Reviews International**, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 1123-1148, 18 ago. 2022.
- LEBLANC, D.; GAGNÉ, M.-J.; BRASSARD, J. Effectiveness of water and sanitizer washing solutions for removing enteric viruses from blueberries. **Food Control**, [s. l.], v. 126, p. 108043, ago. 2021.
- LEPAUS, B. M.; ROCHA, J. S.; SÃO JOSÉ, J. F. B. Organic acids and hydrogen peroxide can replace chlorinated compounds as sanitizers on strawberries, cucumbers and rocket leaves. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 40, p. 242-249, 2020.
- LIMA, M. C. *et al.* A review of the current evidence of fruit phenolic compounds as potential antimicrobials against pathogenic bacteria. **Microbial Pathogenesis**, [s. l.], v. 130, p. 259-270, maio 2019.
- LIMA, M. C.; SOUZA, E. L. A systematic quantitative analysis of the published literature on the efficacy of essential oils as sanitizers in fresh leafy vegetables. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 61, n. 14, p. 2326-2339, 10 jun. 2020.

- LOPES, A. C. *et al.* High-pressure processing effects on microbiological stability, physicochemical properties, and volatile profile of a fruit salad. **Foods**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 1304, 24 abr. 2024.
- LUND, P. A. *et al.* Understanding how microorganisms respond to acid pH is central to their control and successful exploitation. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 11, 24 set. 2020.
- LUO, K. *et al.* Synergistic bactericidal effect of ultrasound combined with oregano essential oil nanoemulsion on *Listeria monocytogenes* and its application in blueberry preservation. **Food Control**, [s. l.], v. 165, p. 110619, nov. 2024.
- MADHAVI, A. *et al.* Disinfectants. In: **Environmental Micropollutants**. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 91-115.
- MANI-LÓPEZ, E.; PALOU, E.; LÓPEZ-MALO, A. Biopreservatives as agents to prevent food spoilage. In: **Microbial Contamination and Food Degradation**. [S. l.]: [s. n.].
- MARQUES, C. S. *et al.* Preservation of ready-to-eat salad: a study with combination of sanitizers, ultrasound, and essential oil-containing β -cyclodextrin inclusion complex. **LWT**, [s. l.], v. 115, 2019.
- MEIRELES, A.; GIAOURIS, E.; SIMÕES, M. Alternative disinfection methods to chlorine for use in the fresh-cut industry. **Food Research International**, [s. l.], v. 82, p. 71-85, 2016.
- MENDOZA, I. C. *et al.* Conventional and non-conventional disinfection methods to prevent microbial contamination in minimally processed fruits and vegetables. **LWT**, [s. l.], v. 165, p. 113714, 2022.
- MONCIOSO, G. L. *et al.* Citric acid and clove essential oil as alternatives to chlorine compounds on sanitization of apples. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 1-7, 2021.
- ÖLMEZ, H.; KRETZSCHMAR, U. Potential alternative disinfection methods for organic fresh-cut industry for minimizing water consumption and environmental impact. **LWT – Food Science and Technology**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 686-693, abr. 2009.

- OULAHAL, N.; DEGRAEVE, P. Phenolic-rich plant extracts with antimicrobial activity: an alternative to food preservatives and biocides? **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 12, 2022.
- PECCINI, L. R. *et al.* In vitro control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Race 3 by the innovative formulation consisting of a thymol-based emulsion, and evaluation of its effects on the vigor of tomato seeds. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 336, p. 113380, 2024.
- PELISSARI, E. M. R. *et al.* Application of chemometrics to assess the influence of ultrasound and chemical sanitizers on vegetables: impact on natural microbiota, *Salmonella* Enteritidis and physicochemical nutritional quality. **LWT**, [s. l.], v. 148, 2021.
- PEREZ, P. F. *et al.* Use of an eco-friendly preservation technology as a strategy to increase the microbiological shelf-life of a novel ready-to-eat salad containing vegetable by-products. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 47, n. 4, 19 abr. 2024.
- PEREZ-LEWIS, K. L. *et al.* Encapsulated plant-derived antimicrobial reduces enteric bacterial pathogens on melon surfaces during differing contamination and sanitization treatment scenarios. **Applied Microbiology**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 460-470, dez. 2021.
- PETRI, E. *et al.* Comparison of peracetic acid and chlorine effectiveness during fresh-cut vegetable processing at industrial scale. **Journal of Food Protection**, [s. l.], v. 84, n. 9, p. 1592-1602, set. 2021.
- PINELA, J.; FERREIRA, I. C. F. R. Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: trends aiming at quality and safety. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 10, p. 2095-2111, 2017.
- PIZZO, J. S. *et al.* Application of essential oils as sanitizer alternatives on the postharvest washing of fresh produce. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 407, p. 135101, 2023.

- RAFFO, A.; PAOLETTI, F. Fresh-cut vegetables processing: environmental sustainability and food safety issues in a comprehensive perspective. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 5, 2022.
- RAMLI, S. *et al.* Antibacterial activity of ethanolic extract of *Syzygium polyanthum* L. (Salam) leaves against foodborne pathogens and application as food sanitizer. **BioMed Research International**, [s. l.], v. 2017, p. 1-13, 2017.
- ROSLI, S. Z. *et al.* Impact of sanitizer solutions on microbial reduction and quality of fresh-cut pennywort (*Centella asiatica*) leaves. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 3, p. 1211-1220, 2022.
- SANTOS, D. L. S. dos *et al.* Evaluation of the stability and antimicrobial activity of emulsions loaded with thymol for the post-harvest sanitization of lettuce (*Lactuca sativa* L). **Food Bioscience**, [s. l.], v. 66, p. 106176, 2025.
- SHAHBAZ, H. M. *et al.* Advances in nonthermal processing technologies for enhanced microbiological safety and quality of fresh fruit and juice products. *In: Food Processing for Increased Quality and Consumption*. [S. l.]: [s. n.].
- SHEN, X.; ZHU, M.-J. Enhancing the efficacy of peracetic acid against *Listeria monocytogenes* and *Listeria innocua* on fresh apples using commercial acidic and alkaline cleaners. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 116, p. 104358, 2023.
- SIMPSON, A. M.-A.; MITCH, W. A. Chlorine and ozone disinfection and disinfection byproducts in postharvest food processing facilities: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 52, n. 11, p. 1825-1867, 2022.
- SORO, A. B.; GARCIA-VAQUERO, M.; TIWARI, B. K. Equipment and recent advances in ultrasound technology. *In: Innovative and Emerging Technologies in the Bio-marine Food Sector*. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 35-61.

- SRUTHI, P. *et al.* Principles of irradiation and its equipment. In: **Non-thermal Food Processing Operations**. [S. l.]: Elsevier, 2023. p. 205-220.
- STRATAKOS, A. C. H. *et al.* Effect of high-pressure processing in combination with *Weissella viridescens* as a protective culture against *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat salads of different pH. **Food Control**, [s. l.], v. 61, p. 6-12, mar. 2016.
- VELOSO, R. J. *et al.* Potential of thyme essential oil on arugula sanitization. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, 2019.
- VIEIRA, D. M. *et al.* Evaluation of plant extracts as an efficient source of additives for active food packaging. **Food Frontiers**, [s. l.], p. 480-488, 2022.
- WHO – World Health Organization. Foodborne diseases estimates. [S. l.]: WHO, 2025. Disponível em: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/who-estimates-of-the-global-burden-of-foodborne-diseases>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- YANG, Z. *et al.* Effects of high hydrostatic pressure and thermal treatment on texture properties of pickled kohlrabi. **LWT**, [s. l.], v. 157, p. 113078, mar. 2022.
- YOON, J.-H.; LEE, S.-Y. Review: comparison of the effectiveness of decontaminating strategies for fresh fruits and vegetables and related limitations. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 58, n. 18, p. 3189-3208, 12 dez. 2018.
- YUAN, L. *et al.* Recent advances in understanding the control of disinfectant-resistant biofilms by hurdle technology in the food industry. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 61, n. 22, p. 3876-3891, 16 dez. 2021.
- ZAMAN, S. *et al.* Use of non-chlorine sanitizers in improving quality and safety of marketed fresh salad vegetables. **Processes**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 1011, 16 maio 2024.
- ZOELLNER, C. *et al.* Peracetic acid in disinfection of fruits and vegetables. In: SIDDIQI, M. W. (ed.). **Postharvest Disinfection**

of Fruits and Vegetables. Cambridge, MA: Academic Press, 2018. p. 53-66.

ZHU, X. *et al.* Acoustic cavitation for agri-food applications: mechanism of action, design of new systems, challenges and strategies for scale-up. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l], v. 105, p. 106850, 2024.

Ultrassom na conservação de frutas, hortaliças e sucos: princípios e aplicações

Bárbara Morandi Lepaus • Jackline Freitas Brilhante de São José

Frutas e hortaliças são fontes de diversos compostos essenciais para a manutenção da saúde, incluindo macronutrientes (como carboidratos, proteínas e lipídios) e micronutrientes (como vitaminas, minerais e outros compostos de importância nutricional e funcional). Diante dos benefícios que proporcionam, profissionais da saúde têm incentivado o consumo desses alimentos, já que eles contribuem para o controle e a prevenção de diversas doenças, como diabetes, hipertensão, hipercolesterolemia e câncer (BALALI *et al.*, 2025; REJMAN *et al.*, 2021).

Esses alimentos podem ser consumidos *in natura*, ou seja, crus, ou ainda na forma de produtos processados, como sucos. Por serem fontes naturais de alguns contaminantes, como microrganismos, alguns processos são comumente aplicados para aumentar a vida útil do alimento e garantir a segurança, evitando que o consumidor seja exposto a possíveis riscos à saúde (PALUMBO *et al.*, 2022).

No caso de alimentos minimamente processados, ou seja, frutas e hortaliças que passaram por processos como seleção, limpeza,

descascamento e corte, por exemplo, e estão prontos para o consumo, a etapa de sanitização é aplicada para reduzir a presença de microrganismos deterioradores e patogênicos (MELO; QUINTAS, 2023). Essa etapa é comercialmente realizada com o uso de agentes químicos, como compostos à base de cloro (DENG *et al.*, 2020). Já em sucos de frutas e hortaliças, tratamentos térmicos, como pasteurização e esterilização, são comumente aplicados para a inativação de enzimas e microrganismos envolvidos na deterioração desses produtos, além de possíveis agentes patogênicos (TAHA *et al.*, 2024).

No entanto, os métodos tradicionais utilizados podem apresentar algumas limitações, como alterações nas propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos, além de preocupações ambientais e de segurança relacionadas ao uso de compostos clorados (DENG *et al.*, 2020; KESAVAN *et al.*, 2023). Diante desses desafios, estratégias alternativas e ambientalmente mais seguras vêm sendo estudadas ao longo dos anos, entre as quais se destaca o ultrassom (US).

O US é uma tecnologia baseada na emissão e propagação de ondas sonoras de alta frequência, acima do limite da audição humana. Trata-se de uma tecnologia limpa e altamente versátil, que pode ser aplicada em diferentes etapas do processamento de alimentos. Sua aplicação também é considerada mais sustentável, alinhando-se às demandas por processos mais limpos e eficientes na indústria alimentícia (KHAN *et al.*, 2022; ZHU *et al.*, 2024).

Considerando todo o exposto, o presente capítulo visa fornecer informações sobre a aplicação do US na conservação de frutas, hortaliças e sucos. Nele, serão apresentados brevemente a história e o desenvolvimento do uso do US, os aspectos tecnológicos e os mecanismos de ação da tecnologia, além de seus efeitos em diferentes propriedades dos alimentos.

História e desenvolvimento do US

As primeiras investigações científicas relatadas sobre ondas sonoras envolveram experimentos intrigantes realizados em 1793. Lazzaro Spallanzani, um padre e fisiologista italiano, procurou explicar como os morcegos eram capazes de navegar no escuro, diferente de seu pássaro de estimação (KEMP, 2017). Em um experimento questionável quanto às questões éticas envolvendo animais, Spallanzani cegou os morcegos, utilizando uma agulha em brasa, e os soltou em uma sala completamente escura. Surpreendentemente, os animais continuaram a voar como se ainda pudessem enxergar, desviando dos obstáculos. No entanto, quando suas bocas foram cobertas, os animais começaram a colidir com os objetos ao seu redor (RAJAMANI *et al.*, 2024).

Embora bastante instigante, o experimento foi documentado apenas em cartas e cadernos de anotações, sem que as observações fossem publicadas formalmente (KEMP, 2017). A compreensão científica sobre como os morcegos voavam no escuro permaneceu sem resposta até 1941, quando dois pesquisadores da Universidade de Harvard documentaram o fenômeno. Donald Griffin e Robert Galambos descreveram que, durante o voo, os morcegos emitem sons supersônicos para detectar objetos em seu caminho. Eles captam as ondas sonoras refletidas por esses objetos e, ao localizar a fonte do eco, determinam a posição exata do obstáculo (GRIFFIN; GALAMBOS, 1941).

Concomitantemente, o interesse pela aplicação de ondas sonoras para fins tecnológicos crescia consideravelmente. No entanto, o principal desafio técnico que impedia avanços na área era a geração e a detecção de ondas de alta frequência. A descoberta do efeito piezoelétrico (capacidade de certos materiais de gerar carga elétrica em resposta a estresse mecânico) foi essencial para superar essas barreiras e impulsionar as pesquisas nesse campo (RAJAMANI *et al.*, 2024; SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022). Paralelamente, cientistas dedicavam esforços para viabilizar o uso de ondas sonoras em diversas áreas da ciência. Foi assim que, no início do século XX,

sistemas de sonar foram desenvolvidos para auxiliar na detecção de icebergs. As ondas acústicas geradas eram capazes de detectar submarinos e, portanto, essa tecnologia foi aplicada na Primeira Guerra Mundial (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022).

Os dispositivos ultrassônicos trouxeram contribuições significativas para o mundo e passaram a despertar o interesse da comunidade científica. Por esse motivo, a tecnologia foi proposta para identificar falhas em metais, ampliando ainda mais suas aplicações. Outra área que se beneficiou significativamente das ondas sonoras foi a medicina, que, desde a década de 1940, passou a utilizar a tecnologia para diagnósticos por imagem, permitindo exames menos invasivos e em tempo real (RAJAMANI *et al.*, 2024).

O uso de US na área de alimentos tem uma história relativamente recente. Na década de 1930, período que antecedeu a Segunda Guerra Mundial, essa tecnologia já era investigada para diversas aplicações, como em processos de emulsificação e na limpeza de superfícies (MASON, 2003). Devido à sua versatilidade e eficiência, o US continuou despertando interesse dos cientistas da área de alimentos, fazendo com que, ao longo dos anos, a tecnologia tenha sido cada vez mais explorada como uma alternativa para diversos métodos tradicionais de processamento de alimentos.

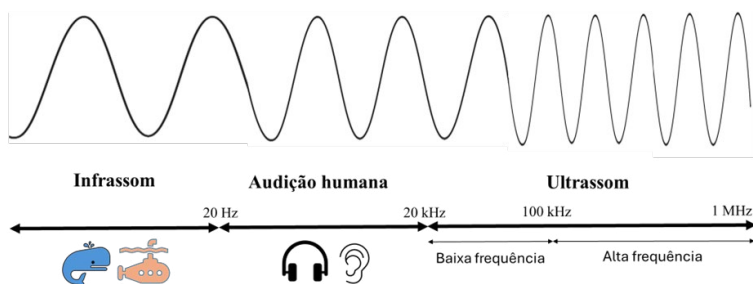
Aspectos tecnológicos e mecanismos de ação do US

Considerando que o som precisa de um meio para se propagar, pode-se dizer que fenômenos acústicos são vibrações que se espalham como uma onda de pressão através do ar, água ou sólidos, a partir de fases de compressão e expansão das partículas (SUJATHA, 2023).

O que determina o tipo de onda sonora é a frequência em que ela é emitida (Figura 1). Ondas sonoras que possuem frequência abaixo da detectável pelo ouvido humano (20 Hz) são denominadas como infrassom. Essa é a zona usada para comunicação entre animais

marinhos, como as baleias, e pelos dispositivos de sonar submarinos. A faixa de audição humana corresponde aproximadamente entre 20 Hz e 20 kHz, embora alguns autores sugiram que o máximo seja 16 kHz. O US refere-se a ondas sonoras que estão em uma frequência acima do limite detectável pelo ser humano. Com base na frequência, o equipamento pode ser ainda classificado em US de baixa frequência (20 a 100 kHz) e US de alta frequência (100 kHz a 1 MHz) (Figura 1). Áreas acima de 1 MHz correspondem ao US de imagem e diagnóstico, usado principalmente para fins de imagens médicas e industriais (KHAN *et al.*, 2022; ZHU *et al.*, 2024).

Figura 1: Tipos e classificação de ondas sonoras

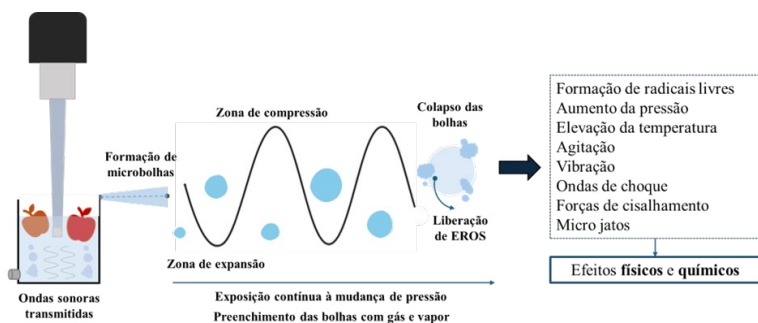


Fonte: Elaborado pelos autores.

Quando aplicado em um meio líquido, as ondas ultrassônicas emitidas pelo equipamento interagem com o conteúdo e induzem a formação alternada de zonas de compressão e de expansão das moléculas. No líquido, quando a diferença entre a pressão máxima (compressão) e a pressão mínima (expansão ou rarefação) da onda sonora é grande o suficiente para superar a resistência do líquido, há a formação de bolhas de cavitação acústica (KHAN *et al.*, 2022; SCHIEPPATI *et al.*, 2024). A cavitação acústica é o principal mecanismo de ação descrito para o US. Esse fenômeno refere-se a um processo complexo e dinâmico no qual microbolhas são geradas em líquidos sob intensa excitação ultrassônica e mudança de pressão. Durante o

ciclo de compressão, as moléculas são empurradas para longe umas das outras devido à pressão positiva exercida no meio. No entanto, quando o ciclo de expansão exerce pressão negativa, as moléculas se aproximam novamente (LEPAUS *et al.*, 2023). A constante oscilação de crescimento, devido aos processos de compressão e expansão das partículas, favorece o preenchimento dessas bolhas com gás e/ou vapor, até que ao atingir tamanho e pressão interna máximos, colapsam de forma intensa (ZHU *et al.*, 2024), conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Representação do processo de cavitação, com formação, crescimento e colapso das bolhas e os efeitos causados no meio líquido



Fonte: Elaborado pelos autores.

Dependendo dos parâmetros operacionais e da composição do meio líquido, os fenômenos de cavitação acústica podem ser classificados como transitórios ou estáveis (ZHU *et al.*, 2024). Sendo assim, as bolhas que permanecem estáveis após as oscilações de pressão são denominadas por cavitação estável. Já quando colapsam após algumas oscilações são descritas como cavitação transitória (TAHA *et al.*, 2024).

Devido à complexidade da cavitação acústica, Qin *et al.* (2024) desenvolveram um modelo para simular e compreender a dinâmica desse processo, considerando a interação entre bolhas de diferentes tamanhos. Como resultado, os efeitos de interação entre as bolhas

foram afetados pela mudança de amplitude e frequência. Bolhas maiores exerceram maior impacto sobre as de menor tamanho, demonstrando a importância em considerar cautelosamente todos os parâmetros de operação para alcançar a efetividade do processo.

Embora seja o principal mecanismo de ação, a eficiência do US não está associada apenas à cavitação acústica. Quando as bolhas de cavitação colapsam, cada uma delas promove uma série de outros fenômenos físicos e químicos, com intensa turbulência, liberação de energia, aumento da pressão e da temperatura do meio, denominados como “*hot spot*”, causando outras reações que podem potencializar a ação da tecnologia (KHAN *et al.*, 2022).

Como resultado do colapso da bolha de gás, devido às condições extremas de pressão, o vapor de água é desintegrado em radicais hidroxil e átomos de hidrogênio ($\cdot\text{H}$, $\cdot\text{OH}$, $\text{OOH}\cdot$, and $\text{O}\cdot$), espécies reativas de oxigênio (EROS) (GUO *et al.*, 2021; KHAN *et al.*, 2022). A natureza reativa das moléculas formadas faz com que esses radicais se recombinem, gerando hidrogênio (H_2), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio (O_2). Essas, por sua vez, são capazes de iniciar, acelerar e até mesmo alterar reações químicas, além de causar danos oxidativos e modificação de macromoléculas. Contudo, a concentração dessas moléculas no meio líquido depende da presença de solutos. Portanto, em sistemas heterogêneos, como matrizes de alimentos, esses processos são mais complexos, devido à diversidade de moléculas químicas presente (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022).

Como descrito anteriormente, no momento do colapso da bolha ocorre liberação intensa de energia e calor, com temperatura local podendo alcançar aproximadamente 5.000 °C (KHAN *et al.*, 2022). Por esse motivo é comum observar aumento de temperatura no meio durante o tratamento com US. Portanto, a resistência e o grau de sensibilidade da amostra ao calor devem ser cuidadosamente avaliados durante o processo. Além disso, é fundamental que a temperatura do meio seja monitorada constantemente, a fim de evitar aumentos excessivos, a depender do tempo de exposição ao equipamento.

Uma alternativa que já se mostrou eficaz para o controle de temperatura é a instalação de um sistema de refrigeração (CAO *et al.*, 2018).

Em geral, além da cavitação, formação de radicais livres e aumento da pressão e temperatura, os fenômenos físicos e químicos causados pelo US incluem agitação, vibração, ondas de choque, forças de cisalhamento e microjatos (TAHA *et al.*, 2024). Todos esses efeitos ocorrem simultaneamente e são capazes de perturbar consideravelmente as paredes celulares e as estruturas moleculares, enfraquecendo-as e liberando o material intracelular (KHAN *et al.*, 2022). A perturbação causada promove, por exemplo, a inativação microbiana, extração de compostos bioativos e a modificação de outras moléculas. Contudo, a intensidade e a eficiência desses fenômenos dependem de fatores como a frequência do US, a potência aplicada, tempo de exposição, além das próprias características do alimento tratado.

Tipos de equipamentos aplicáveis no processamento de alimentos

A aplicação do US para a conservação de alimentos é comumente realizada utilizando dois tipos de equipamentos: US tipo banho e US tipo sonda. A escolha do tipo de equipamento dependerá do objetivo da aplicação e da quantidade de amostra a ser tratada. Embora ambos possuam o mesmo princípio de operação, diferem entre si nos componentes do equipamento e na forma como as ondas sonoras são transmitidas ao meio líquido, podendo influenciar a eficiência e os efeitos do processo.

O equipamento de US opera, basicamente, a partir de três elementos principais: o gerador, o transdutor e o emissor. O gerador transforma o sinal elétrico em uma frequência determinada, e é essencial para gerar as ondas ultrassônicas necessárias para a aplicação. O transdutor converte o sinal elétrico de alta frequência gerado em vibrações mecânicas. Já o emissor é responsável por irradiar essas

vibrações mecânicas no meio de operação (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022).

Nos equipamentos de banho de US, os transdutores podem estar fixados na base ou nas laterais do tanque, favorecendo a propagação das ondas de maneira mais difusa no meio líquido. Além disso, mais transdutores podem aumentar a eficiência do processo de cavitação. Os banhos ultrassônicos geralmente operam em frequências entre 40 e 130 kHz, embora, recentemente, alguns equipamentos tenham sido desenvolvidos para operar acima desse limite, favorecendo os efeitos químicos do tratamento. Isso faz com que a capacidade destes banhos seja menor (1–2 L), pois a potência necessária para gerar o processo de cavitação é menor em frequências mais elevadas, quando comparada a dispositivos que operam em frequências mais baixas (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022).

Uma das vantagens do uso de banhos ultrassônicos é a possibilidade de tratar maiores quantidades de amostra. Por esse motivo, podem ser mais adequados para aplicações em larga escala (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022). Também podem ser mais eficientes em operações como limpeza de superfícies, homogeneização leve e extração de compostos bioativos. Contudo, parte da energia gerada pode ser significativamente perdida na forma de calor para o meio circulante, uma vez que os transdutores não ficam em contato direto com a amostra, podendo reduzir a eficiência na transmissão direta de energia para amostras específicas (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022).

Já nos equipamentos do tipo sonda, que operam em frequências entre 20 e 40 kHz, a energia é aplicada de forma mais concentrada, por meio de uma ponta metálica conectada ao transdutor, em uma estrutura conhecida como sonotrodo. O sonotrodo opera submerso em líquido, irradiando as ondas ultrassônicas e gerando cavitação localizada e intensa (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022). Modelos mais recentes de equipamentos estão sendo desenvolvidos

de modo que operem em contato indireto com a amostra tratada (ZHU *et al.*, 2024).

Equipamentos do tipo sonda são mais eficientes para quebra de células, modificação de proteínas, inativação enzimática e emulsificação, pois permitem um controle mais preciso da intensidade do US. Além disso, como o sonotrodo opera em contato direto com o líquido, as perdas de energia são reduzidas, podendo aumentar a eficiência do processo de cavitação. Isso pode resultar em tempos de tratamento mais curtos e maior rendimento de extração em comparação com os banhos ultrassônicos. Contudo, esses equipamentos são geralmente utilizados para tratar volumes menores de amostra, devido à sua capacidade reduzida. Além disso, o aumento da cavitação pode elevar a temperatura do tratamento, o que pode levar à degradação de compostos sensíveis ao calor (SORO; GARCIA-VAQUERO; TIWARI, 2022).

Com o desenvolvimento de equipamentos mais precisos e acessíveis, o US tornou-se uma ferramenta valiosa para a indústria alimentícia. No entanto, considerando todos os desafios descritos e objetivando superar as limitações quanto ao escalonamento da tecnologia, várias estratégias ainda têm sido propostas, com intuito de melhorar os reatores, otimizar condições de processo, permitir maior controle de operação e aumentar a eficiência (ZHU *et al.*, 2024).

Combinação do US com outras tecnologias

Baseado no princípio do equipamento, a tecnologia é considerada não térmica. Por esse motivo, tem-se mostrado como uma boa opção para manter a qualidade dos alimentos. Apesar disso, o US pode ser combinado com outras tecnologias para potencializar os efeitos de sua aplicação na conservação de alimentos, garantindo uma abordagem inovadora para o processamento.

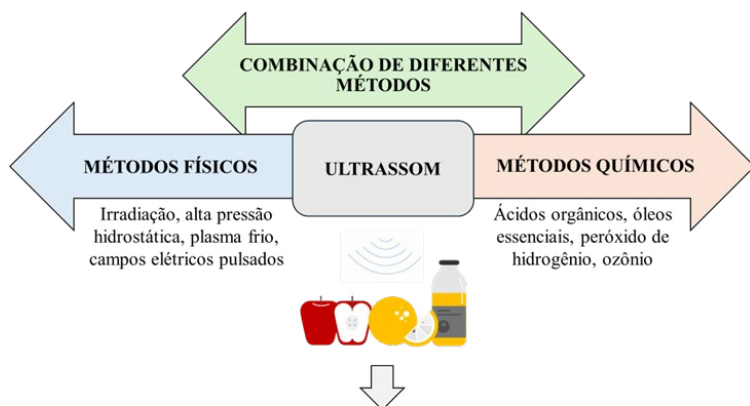
Por exemplo, ao ser combinado com tratamentos térmicos (termossonicação), a tecnologia pode aumentar a inibição de enzimas indesejadas (CAO *et al.*, 2018) ou inativar microrganismos de forma mais eficiente (NICOLAU-LAPEÑA *et al.*, 2022). Por outro lado, a combinação com alta pressão (manossonicação) já demonstrou ser mais eficiente na extração de pectina (HU *et al.*, 2021), enquanto a associação de ambas as tecnologias (manotermossonicação) demonstrou potencial para inativar a *Salmonella* Enteritidis em ovos líquidos de forma similar à pasteurização convencional (BEITIA *et al.*, 2024).

Além disso, a aplicação do US com agentes químicos e antimicrobianos naturais têm se mostrado uma tecnologia eficiente na etapa de desinfecção de produtos minimamente processados. Compostos como ácidos orgânicos (IRAZOQUI *et al.*, 2024; TURHAN *et al.*, 2022), óleos essenciais (DUAN *et al.*, 2024; LUO *et al.*, 2024), peróxido de hidrogênio (PELISSARI *et al.*, 2021) e ozônio (MARYAM *et al.*, 2021; SUN *et al.*, 2022), por exemplo, têm sido estudados como coadjuvantes ao US na conservação de alimentos, ampliando a inativação microbiana em superfícies.

Por ser uma tecnologia altamente versátil, o US pode ainda ser combinado com outros métodos físicos, como micro-ondas (ZHOU; CHEN; FAN, 2024), alta pressão hidrostática (CHEN *et al.*, 2022), plasma frio (MURAKONDA; DWIVEDI, 2024), irradiação (RAMÍREZ-CORONA *et al.*, 2024) e campos elétricos pulsados (RAZOLA-DÍAZ *et al.*, 2024).

A Figura 3 demonstra um pouco da versatilidade do equipamento, permitindo que ele seja aplicado para diversos processos, como tratamento térmico, descontaminação, extração, emulsificação, homogeneização e conservação, entre diversos outros, abrangendo um amplo espectro de alimentos, desde líquidos e sólidos.

Figura 3: Possíveis aplicações do ultrassom combinado ou não a diferentes tratamentos para a conservação de alimentos



Extração de compostos (óleos essenciais, bioativos, proteínas e polissacarídeos).

Limpeza e descontaminação de superfícies (utensílios e alimentos).

Inativação de microrganismos patogênicos e deterioradores.

Remoção de gases dissolvidos em alimentos líquidos.

Homogeneização de produtos líquidos.

Inativação de enzimas deterioradoras.

Emulsificação de alimentos.

Modificação de proteínas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Inativação microbiana

Frutas e hortaliças são fontes naturais de contaminação por microrganismos. Isso ocorre, pois, durante o plantio, a colheita e o processamento desses alimentos, eles podem ser expostos a diversas fontes de contaminação, como solo, água, presença de animais, além de condições higiênicas inadequadas no manuseio, transporte, armazenamento (KHANASHYAM *et al.*, 2022; SÃO JOSÉ; FARIA-SILVA; LEPAUS, 2022). Para aumentar a vida de prateleira dos alimentos,

como os minimamente processados e bebidas à base de frutas e hortaliças, alguns processos são aplicados com intuito de reduzir microrganismos deterioradores e patogênicos, garantindo a segurança do produto e não expondo o consumidor a possíveis riscos biológicos.

Devido às limitações do uso isolado do US e às aplicações restritas da combinação de com temperaturas em produtos frescos, os agentes químicos utilizados como sanitizantes podem representar alternativas eficazes aos compostos clorados (NICOLAU-LAPEÑA *et al.*, 2019). No caso do processamento mínimo de frutas e hortaliças, o US pode ser utilizado em soluções aquosas, combinado a agentes químicos antimicrobianos, ou outros métodos descritos anteriormente, na etapa de sanitização desses alimentos (ZHOU; SARPONG; ZHOU, 2022).

A combinação de ultrassom com ácidos orgânicos e peróxido de hidrogênio aumentou a eficiência de inativação microbiana em mesófilos aeróbios, fungos, leveduras e *Salmonella Enteritidis* aderidas na superfície de alimentos folhosos (rúcula e couve) e não folhosos (morango e pepino) (PELISSARI *et al.*, 2021). Em folhas de repolho, a combinação de ultrassom e nanoemulsão de óleo essencial de manjerição apresentaram efeitos sinérgicos na inativação de *Shigella flexneri* (DUAN *et al.*, 2024). De forma semelhante, a aplicação do ultrassom com emulsão de óleo essencial de tomilho incrementou o efeito antimicrobiano do equipamento quando aplicado na desinfecção de tomates-cereja (HE *et al.*, 2021). É importante destacar que, embora os óleos essenciais apresentem elevado poder antimicrobiano, questões como o sabor e o aroma residual nos alimentos devem ser consideradas, pois são substâncias altamente voláteis e podem alterar as características sensoriais do produto (DENG *et al.*, 2020).

Já no processamento de sucos, a tecnologia tem sido estudada como alternativa aos processos térmicos, como a esterilização e pasteurização, reduzindo as populações microbianas, com menor comprometimento de compostos termossensíveis, como vitaminas e compostos bioativos (LEPAUS *et al.*, 2023).

Algumas evidências sugerem que a aplicação do US associada a temperaturas acima de 40 °C são mais eficientes para promover maior redução de microrganismos deterioradores e patogênicos presentes em sucos (MENELLI *et al.*, 2021). Contudo, reduções logarítmicas maiores que 5 log UFC/mL de *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* e *Saccharomyces cerevisiae* foram observadas ao expor suco de limão-doce (*Citrus limetta*) a intensidades ultrassônicas mais elevadas entre 25 e 30 minutos (sonda, 20 kHz, 250 W), sem associação com temperaturas (SHAIK; CHAKRABORTY, 2022).

Li *et al.* (2025) observaram que tratamentos aplicados a 50 °C por 5 a 15 min e a 60 °C por 5 a 10 min não foram capazes de eliminar totalmente as contagens de bactérias totais, fungos filamentosos, leveduras e *Escherichia coli* em suco de tomate, embora as contagens nas amostras tenham sido menores em comparação ao suco não tratado. Contudo, no tratamento a 60 °C por 15 min e a 70 °C por 5 a 15 min, nenhum microrganismo foi detectado.

De maneira geral, os fenômenos causados pelo US afetam os microrganismos por meio do rompimento e cisalhamento das membranas celulares, resultando no extravasamento do conteúdo intracelular. Além disso, o US pode causar danos irreversíveis ao DNA, comprometendo a viabilidade microbiana (KHAN *et al.*, 2022). No entanto, a eficácia da inativação microbiana depende de diversos fatores, incluindo as características intrínsecas dos microrganismos expostos, bem como as condições do tratamento, como temperatura, tempo, potência aplicada. Além disso, quando combinado com outros métodos, os efeitos antimicrobianos do US podem ser intensificados.

Remoção de resíduos de pesticidas

A infestação de insetos-praga nas lavouras gera uma grande preocupação, pois compromete a produtividade, resultando em perdas consideráveis de alimentos, além de recursos financeiros. A aplicação de

pesticidas sintéticos em frutas e hortaliças é uma prática comum na agricultura moderna, utilizada principalmente para proteger as culturas de pragas, doenças e ervas daninhas que podem comprometer a produtividade e a qualidade dos alimentos. Alguns produtos químicos são utilizados para garantir que os alimentos cheguem ao consumidor em condições adequadas, minimizando perdas econômicas e garantindo o abastecimento de alimentos em larga escala (TAVARES; BARRETO; SECA, 2021; ZHANG *et al.*, 2022).

Apesar dos benefícios citados, o uso de pesticidas gera preocupações, principalmente em relação à saúde humana e ao meio ambiente. Resíduos de pesticidas podem permanecer nos alimentos e, se consumidos em excesso, trazer diversos riscos à saúde. Além disso, o uso indiscriminado desses produtos pode contaminar solos, água e afetar ecossistemas, prejudicando a biodiversidade (TAVARES; BARRETO; SECA, 2021).

Embora não seja muito explorada, alguns trabalhos investigaram a eficiência de descontaminação de pesticidas em diferentes alimentos frescos (Tabela 1).

Além disso, o tipo de equipamento utilizado, banho ou sonda, também pode influenciar a maior ou menor taxa de eliminação dos pesticidas. Essa diferença também pode ser atribuída às diferenças nas propriedades físico-químicas dos pesticidas testados (CENGIZ *et al.*, 2018). Outro fator que pode afetar a eficiência é o tipo de alimento tratado, devido às características intrínsecas da superfície como textura e rugosidade. Em estruturas mais rugosas, como de alimentos folhosos, os resíduos de pesticidas podem estar alocados em fissuras presentes na superfície do alimento, dificultando o acesso do US. Isso ocorre, pois a energia do equipamento se dissipa ao atravessar qualquer material, fazendo com que menos energia chegue a essas estruturas (CENGIZ *et al.*, 2021).

Vale ressaltar, que devido às preocupações relacionadas ao uso de pesticidas, há um esforço crescente para promover o uso responsável dos produtos químicos utilizados. Entre as propostas estão a

combinação de diferentes métodos para reduzir a dependência de pesticidas; desenvolvimento e aplicação de produtos menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana; e maior rigidez quanto às normas que tange a quantidade de resíduos de pesticidas permitidos nos alimentos (ZHANG *et al.*, 2022).

Tabela 1: Estudos que avaliaram efeito do ultrassom na remoção de pesticidas de frutas e hortaliças

Amostra	Condições aplicadas	Observações adicionais	Pesticidas avaliados	Principais achados	Referência
Folhas de uva	Banho (37 kHz); 150 W; 24 °C; 5 a 15 minutos	Comparou com lavagem em água convencional	Acetamiprida, deltametrina e piridabeno	Tratamento por 10 minutos com ultrassom foi mais eficiente, reduzindo em média 56% os pesticidas avaliados	AYDAR <i>et al.</i> , (2023)
Alface	Banho (40 kHz) e sonda (24 kHz); 25 °C; 10 minutos	Combinação do ultrassom com correntes elétricas de baixa intensidade	captan, tiametoxam e metalaxil	Maiores taxas de degradação (>60%) foram observadas para aplicações com sonda ultrassônica, para todos os agentes testados.	CENGIZ <i>et al.</i> , (2021)
Tomates	Banho (40 kHz) e sonda (24 kHz); 25 °C; 10 minutos	Avaliou efeito sinérgico do ultrassom com correntes elétricas de baixa intensidade	Captana, tiametoxam e metalaxil	Maior taxa de degradação da captana em banho comparado à sonda. Para os demais agentes testados, a aplicação com sonda foi mais eficaz. A associação com correntes elétricas potencializou as taxas de redução dos pesticidas.	CENGIZ <i>et al.</i> , (2018)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Inativação enzimática em alimentos

As enzimas são proteínas naturalmente presentes nos alimentos, que aceleram reações químicas essenciais na matriz vegetal, como amadurecimento e desenvolvimento de sabor. No entanto, algumas delas podem ser indesejáveis, causando escurecimento, perda de qualidade e redução da vida de prateleira dos produtos (RATHNAKUMAR *et al.*, 2023).

Um grande exemplo são as oxirredutases, como a polifenoloxidase (PPO), peroxidase (POD) e lipoxigenase (LOX), presentes em frutas e hortaliças como maçã, banana, batata e soja, e estão associadas ao processo de escurecimento e oxidação nesses alimentos. Durante o processamento, o tecido vegetal é rompido, liberando nutrientes, vitaminas e compostos bioativos, responsáveis pela bioatividade e propriedades sensoriais dos alimentos. Contudo, esse mesmo processo expõe as oxirredutases, que em contato com os substratos podem catalisar reações indesejáveis, levando ao escurecimento enzimático, degradação de polifenóis e vitaminas, e oxidação de lipídeos. Todas essas alterações afetam o sabor, a estabilidade e reduzem a qualidade do produto (LI *et al.*, 2024).

As hidrolases, por sua vez, como a pectinesterase (PE), são enzimas que degradam macromoléculas e afetam a estabilidade física e reológica de produtos. Ao modificar a estrutura da pectina, por exemplo, a PE pode afetar negativamente parâmetros como textura, viscosidade e turbidez de alimentos líquidos à base de frutas e vegetais, podendo causar prejuízos sensoriais que diminuem a aceitação pelo consumidor (HOSSAIN; AHMED, 2023; RATHNAKUMAR *et al.*, 2023).

A inativação dessas enzimas é importante para preservar a qualidade nutricional e os aspectos sensoriais como textura, cor e sabor, além de aumentar o prazo de validade de frutas, vegetais e produtos derivados. Usualmente, tratamentos térmicos são aplicados para inativar enzimas envolvidas no processo de deterioração (RATHNAKUMAR *et al.*, 2023). Devido à termosensibilidade de alguns

compostos nutricionais, diferentes tecnologias, incluindo o US, têm sido testadas com objetivo de obter baixas atividades enzimáticas residuais em diversos produtos (BASAK; CHAKRABORTY, 2022; UMAIR *et al.*, 2022).

A cinética de inativação da PPO em suco de *yamamomo* (*Morella rubra*), um fruto amplamente cultivado no sul da China, foi estudada por Cao *et al.* (2018) durante tratamentos térmicos (55 a 75 °C; 1 a 30 minutos) e ultrassônicos (tipo sonda, 600 W, 20 kHz). Nos tratamentos térmicos, o tempo necessário para reduzir a atividade da enzima em 90%, variou entre 151,99 e 6,23 minutos. Quando o US foi utilizado, o tempo foi reduzido para 41,44 a 2,59 minutos, indicando que essa tecnologia acelerou a inativação da enzima. Por outro lado, ao aplicar o US em conjunto com refrigeração para um maior controle da temperatura do processo, o tempo aumentou para 55,92 a 7,05 minutos. Ainda assim, o tempo necessário para inativação da PPO utilizando US com controle de temperatura permaneceu inferior ao dos tratamentos térmicos.

Em condições mais brandas de sonicação (<0,1 W/cm³) de suco limão-doce (*Citrus limetta*) por 15 minutos, a atividade residual enzimática variou entre 72,6% e 81,4% para a PPO e 72,6% a 78,3% para a POD. Aos 30 minutos de potência a 0,70 W/cm³, tratamento de maior intensidade testado, a atividade residual alcançou 40,2% para a PPO e 4,5% para a POD. Para a PE, ao aumentar a intensidade do US, a atividade residual foi reduzida significativamente, alcançando 0,2%, indicando que a tecnologia foi altamente eficaz na inativação desta enzima (SHAIK; CHAKRABORTY, 2022).

Já em hortaliças minimamente processadas, o tratamento por termossonicação a 60 °C por 12 minutos aumentou significativamente a eficiência de inativação da POD em cenouras fatiadas, em comparação com os tratamentos de US a 25 °C e água quente a 60 °C, no mesmo tempo de exposição. A termossonicação reduziu os valores de atividade residual da enzima para 22% ao final do tratamento,

representando uma redução de 65% em relação às fatias de cenoura tratadas apenas termicamente (GUO *et al.*, 2021).

A eficácia da inativação enzimática por US depende da estrutura química da proteína, e diferentes enzimas apresentam comportamento e resistência diferentes ao tratamento com US. De maneira geral, a inativação enzimática pelo US é atribuída principalmente aos princípios físicos e/ou químicos da tecnologia e o modo de ação é semelhante ao que ocorre com os microrganismos. Sob condições extremas da sonicação, como a formação de radicais, calor, pressão e ondas de choque, descritas anteriormente, ocorre a quebra das ligações de hidrogênio, bem como das interações de van der Waals nas cadeias polipeptídicas. Dessa forma, as estruturas secundárias e terciárias das enzimas são alteradas, levando à desnaturação da enzima e, consequentemente, à sua inativação, resultando na perda de sua atividade biológica (ISLAM; ZHANG; ADHIKARI, 2014).

Além disso, os fenômenos do US são capazes de inibir a expressão do gene das enzimas durante o tratamento por termossonicação, a partir da destruição das vias de síntese correspondentes nas células vegetais. Somado a isso, os radicais livres formados a partir da decomposição da água induzida pelo US desempenham papel importante na inativação enzimática durante os tratamentos (GUO *et al.*, 2021).

Impacto nas propriedades sensoriais dos alimentos

As propriedades sensoriais dos alimentos, como textura, cor e sabor, são fatores críticos para a aceitação dos produtos pelo consumidor, influenciando diretamente a percepção de qualidade e a experiência durante o consumo (ROCHA *et al.*, 2022). No contexto da aplicação do US, essas características podem ser significativamente afetadas. O US é capaz de romper estruturas moleculares e alterar a microestrutura de componentes presentes em sucos, como polissacarídeos, proteínas e outras partículas em suspensão (UMAÑA *et al.*, 2022). Essas

alterações impactam diretamente parâmetros de qualidade, como textura e turbidez (LEPAUS *et al.*, 2022), e também podem ter efeitos na cor, que são parâmetros essenciais para a aceitação dos produtos (ROCHA *et al.*, 2022).

A textura é um atributo fundamental da qualidade do alimento e é determinada principalmente pela microestrutura do produto. Estudos já documentaram o efeito em nível de microestrutura em componentes de frutas, vegetais e sucos após tratamentos com US (LEPAUS *et al.*, 2022; MENELLI *et al.*, 2021; UMAÑA *et al.*, 2022). Eles ocorrem principalmente devido ao efeito da cavitação acústica, que durante o colapso das bolhas formadas libera energia mecânica intensa e suficiente para quebrar ligações químicas e modificar a organização estrutural dos componentes do suco.

Os danos causados às células vegetais favorecem a quebra de partículas maiores em moléculas menores, aumentando a distribuição do tamanho de partículas de sucos, por exemplo. Além disso, o ultrassom é capaz de promover a homogeneização de líquidos, devido a redução do tamanho das partículas. Consequentemente, favorece o processo de sedimentação, reduzindo a deposição aparente de partículas e melhorando a estabilidade durante o armazenamento (LEPAUS *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2025; SUO *et al.*, 2022).

A aplicação do US também é capaz de contribuir para a melhora de cor em sucos de frutas e hortaliças. Em suco de morango, os tratamentos tornaram o meio mais luminoso e com coloração mais intensa. Contudo, amostras sonicadas de sucos de morango tratadas a 50 °C por 15 min apresentaram menores índices de aceitação sensorial (MENELLI *et al.*, 2021). Em outro estudo, foi observado que a luminosidade do suco de tomate também aumentou após a termossonicação, mesmo nas condições mais extremas de tratamento testadas (70 °C por 5 a 15 min). A amostra controle apresentou o menor índice de luminosidade, enquanto a amostra tratada apenas por tratamento térmico (85 °C; 10 min) apresentou o pior desempenho para preservação desse atributo (LI *et al.*, 2025).

O incremento de cor em sucos de frutas e hortaliças ocorre devido a precipitação de algumas partículas presentes, além de liberação de compostos intracelulares responsáveis pela coloração desses alimentos (AGHAJANZADEH; ZIAIIFARA; VERKERK, 2023).

Outra importante característica analisada por Li *et al.* (2025) foram os atributos de aroma em suco de tomate tratado por termossonicação (50 a 70 °C). Os resultados demonstraram que a termossonicação não alterou a composição dos componentes do aroma no suco de tomate, mas aumentou o conteúdo ou a concentração desses compostos. Além disso, todas as amostras foram bem aceitas no teste de aceitação sensorial, demonstrando que os tratamentos não causaram prejuízos nos parâmetros avaliados (cor, aroma, sabor, sensação na boca e aceitação global).

Outro estudo avaliou a aceitação sensorial de suco misto de laranja com cenoura submetido à termossonicação a 60 °C por 5 ou 10 minutos, condição que apresentou maior eficiência na inativação microbiana. O suco tratado por 5 minutos obteve avaliações similares ao tratamento térmico convencional (90 °C por 30 segundos), indicando um efeito positivo nos parâmetros analisados (cor, aroma, sabor, consistência, aceitação global e intenção de compra). No entanto, o prolongamento do tempo de ultrassom para 10 minutos resultou em maior rejeição pelos consumidores, com menores notas atribuídas ao aroma e ao sabor das amostras (LEPAUS *et al.*, 2023).

Diante dos resultados, observa-se que os efeitos do ultrassom variam conforme o tipo de amostra tratada e as condições de aplicação do tratamento, tornando necessário investigar métodos para otimizar os resultados e garantir a aceitação pelos consumidores.

Impacto nos compostos nutricionais e antioxidantes

O efeito de tratamentos com ultrassom (US) sobre compostos bioativos é um assunto complexo, uma vez que diversas variáveis podem influenciar esse processo. Compostos nutricionais, como polifenóis e vitaminas, são mais suscetíveis a condições adversas, como elevação de temperatura, exposição à luz e presença de oxigênio (NISHIMOTO-SAUCEDA; ROMERO-ROBLES; ANTUNES-RICARDO, 2022; SHI *et al.*, 2022).

Pelissari *et al.* (2021) avaliaram diferentes tratamentos de sanitização com uso do ultrassom associado a agentes químicos (ácidos orgânicos e peróxido de hidrogênio) em amostras de rúcula, couve, pepino e morango. Os autores observaram que os compostos fenólicos totais foram os mais sensíveis aos tratamentos aplicados. Contudo, em outro estudo envolvendo sanitização de couve com ultrassom, ácido acético e ácido peracético, nenhuma alteração no conteúdo de vitamina C e compostos fenólicos totais foi observada (MACHADO *et al.*, 2022).

Ao sonicar suco de yamamomo sob diferentes condições, Cao *et al.* (2018) observaram um tendente aumento dos compostos fenólicos totais, dependendo da potência e do tempo de tratamento. Em níveis mais baixos de amplitude e tempo, as alterações não foram significativas. Contudo, amostras sonicadas acima de 181 W/cm^2 apresentaram aumento dos compostos fenólicos totais entre 3,55 e 9,57%. Além disso, o resfriamento durante o tratamento com US, ao controlar a temperatura e evitar seu aumento excessivo, favoreceu a maior retenção dos compostos fenólicos. Os valores obtidos foram mais altos nas amostras com controle térmico do que naquelas submetidas ao US sem resfriamento, mesmo quando tratadas com a mesma potência e tempo de sonicação.

Em outro estudo com suco de morango submetido a diferentes condições de temperatura (25, 40 ou 50 °C) e tempo (5, 10 ou 15 min)

com US (banho, 40 kHz), todas as condições foram mais eficazes em preservar o conteúdo de ácido ascórbico, compostos fenólicos, antocianinas e capacidade antioxidante, comparado ao tratamento térmico por 1 min a 90 °C (MENELLI *et al.*, 2021). Temperaturas mais altas e tempos prolongados (60 °C, 15 min) foram capazes de aumentar o conteúdo de licopeno, ácido ascórbico, flavonoides e fenólicos totais em suco de tomate. Além disso, o tratamento foi capaz de manter a alta atividade antioxidante, apresentando melhores resultados quando comparado ao tratamento térmico aplicado a 85 °C por 10 min (LI *et al.*, 2025).

O aumento do conteúdo de compostos bioativos em alimentos tratados com US é atribuído ao processo de cavitação e aos danos causados à parede celular vegetal. A quebra da parede celular facilita a liberação de compostos intracelulares e também daqueles ligados à matriz (WANG *et al.*, 2019). Contudo, algumas perdas podem ocorrer devido à exposição desses compostos às espécies reativas geradas durante o tratamento com US, podendo afetar a capacidade antioxidante e coloração da amostra (LEPAUS *et al.*, 2023).

Conforme apresentado nesta seção, a aplicação do US não impede que ocorram perdas nutricionais e de compostos bioativos. Contudo, a tecnologia tem-se mostrado uma alternativa promissora para o processamento de alimentos. Embora a exposição ao oxigênio formado durante a sonicação possa impactar alguns compostos bioativos, essa técnica preserva melhor a qualidade dos alimentos em comparação a outros métodos convencionais, resultando em menor degradação de nutrientes e compostos bioativos, como os polifenóis.

Considerações finais

A demanda por métodos de processamento menos invasivos e mais ecológicos deve impulsionar a adoção do US em larga escala, contribuindo para a produção de alimentos seguros, nutritivos e de alta

qualidade. Somado a isso, o futuro do uso de US na indústria alimentícia parece promissor, com pesquisas contínuas focadas em expandir suas aplicações e melhorar sua eficiência.

Apesar dos avanços, o custo inicial dos equipamentos e a necessidade de otimização dos parâmetros de processo para cada aplicação específica ainda são desafios para a adoção em larga escala. Contudo, a tecnologia de US, por si só, pode não ser totalmente viável para ser usada em processos de tratamento em larga escala, pois requer equipamentos caros e o consumo abundante de energia, uma vez que nem toda a energia cavitacional pode ser transformada em efeitos químicos e físicos. Por esse motivo, a combinação do US com outras tecnologias emergentes, sejam elas físicas, sejam químicas, pode abrir novas possibilidades para o processamento de alimentos mais saudáveis e sustentáveis.

Referências

- AGHAJANZADEH, S.; ZIAIIFARA, A. M.; VERKERK, R. **Effect of thermal and non-thermal treatments on the color of citrus juice: a review. Food Reviews International**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 3555-3577, 18 ago. 2023.
- AYDAR, A. Y. *et al.* Effect of ultrasound assisted cleaning on pesticide removal and quality characteristics of Vitis vinifera leaves. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 92, p. 106279, jan. 2023.
- BALALI, G. I. *et al.* Fruits and vegetables as a source of nutraceuticals: twenty-first century perspective. In: AMIR ASHRAF, S.; ADNAN, M. (eds.). **Food bioactives and nutraceuticals: dietary medicine for human health and well-beings**. Singapore: Springer Nature, 2025. p. 409-435.
- BASAK, S.; CHAKRABORTY, S. The potential of nonthermal techniques to achieve enzyme inactivation in fruit products. **Trends**

- in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 123, p. 114-129, 1 maio 2022.
- BEITIA, E. *et al.* Modelling of Salmonella Enteritidis inactivation in liquid whole egg under dynamic manothermosonication treatments. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 92, p. 103597, mar. 2024.
- CAO, X. *et al.* The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 45, p. 169-178, fev. 2018.
- CENGIZ, M. F. *et al.* Reduction of pesticide residues from tomatoes by low intensity electrical current and ultrasound applications. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 267, p. 60-66, nov. 2018.
- CENGIZ, M. F. *et al.* A novel technique for the reduction of pesticide residues by a combination of low-intensity electrical current and ultrasound applications: a study on lettuce samples. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 354, p. 129360, ago. 2021.
- CHEN, T. *et al.* Combined effect of thermosonication and high hydrostatic pressure on bioactive compounds, microbial load, and enzyme activities of blueberry juice. **Food Science and Technology International**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 169-179, 25 mar. 2022.
- DENG, L.-Z. *et al.* Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 60, n. 15, p. 2481-2508, 21 ago. 2020.
- DUAN, L. *et al.* The inactivation of Shigella flexneri by synergistic effect of ultrasound combined with basil essential oil nanoemulsion and application in cabbage cleaning. **Food Control**, [s. l.], v. 156, p. 110142, fev. 2024.
- GRIFFIN, D. R.; GALAMBOS, R. The sensory basis of obstacle avoidance by flying bats. **Journal of Experimental Zoology**, [s. l.], v. 86, n. 3, p. 481-506, 19 abr. 1941.

- GUO, Y. *et al.* Ultrasonication and thermosonication blanching treatments of carrot at varying frequencies: effects on peroxidase inactivation mechanisms and quality characterization evaluation. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 343, p. 128524, maio 2021.
- HE, Q. *et al.* Ultrasound improves the decontamination effect of thyme essential oil nanoemulsions against *Escherichia coli* O157: H7 on cherry tomatoes. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], v. 337, p. 108936, jan. 2021.
- HOSSAIN, M. B.; AHMED, L. Application of enzymes in juice clarification. In: KUDDUS, M.; HOSSAIN, M. (eds.). **Value-addition in beverages through enzyme technology**. [S. l.]: Academic Press, 2023. p. 97-104.
- HU, W. *et al.* Manosonication assisted extraction and characterization of pectin from different citrus peel wastes. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 121, p. 106952, dez. 2021.
- IRAZOQUI, M. *et al.* Combined peracetic acid: power ultrasound disinfection process enhances bioactive compounds and preserves quality attributes of fresh-cut lettuce (cv. Vera). **Discover Food**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 14, 29 fev. 2024.
- ISLAM, M. N.; ZHANG, M.; ADHIKARI, B. The inactivation of enzymes by ultrasound—a review of potential mechanisms. **Food Reviews International**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 1-21, 2 jan. 2014.
- KEMP, C. **The ingenious priest who discovered how bats “see” in the dark**. 2025. Disponível em: <https://www.newscientist.com/article/mg23631520-900-the-ingenious-priest-who-discovered-how-bats-see-in-the-dark/>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- KESAVAN, R. K. *et al.* Hurdle effect of thermosonication and non-thermal processing on the quality characteristics of fruit juices: an overview. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 46, n. 6, p. e14310, 2023.

- KHAN, S. A. *et al.* High intensity ultrasound processing in liquid foods. **Food Reviews International**, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 1123-1148, 18 ago. 2022.
- KHANASHYAM, A. C. *et al.* Decontamination of fruits. In: SHAH, M. A.; MIR, S. A. (eds.). **Microbial decontamination of food**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 47-70.
- LEPAUS, B. M. *et al.* Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 138, p. 752-765, ago. 2023.
- LEPAUS, B. M. *et al.* Stability parameters during refrigerated storage and changes on the microstructure of orange-carrot blend juice processed by high-power ultrasound. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 6, 10 nov. 2022.
- LEPAUS, B. M. *et al.* Thermosonication of orange-carrot juice blend: overall quality during refrigerated storage, and sensory acceptance. **Molecules**, [s. l.], v. 28, n. 5, p. 2196, jan. 2023.
- LI, L. *et al.* Thermosonication enhanced the bioactive, antioxidant, and flavor attributes of freshly squeezed tomato juice. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 115, p. 107299, abr. 2025.
- LI, R. *et al.* The relationship between cell wall and postharvest physiological deterioration of fresh produce. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 210, p. 108568, maio 2024.
- LUO, K. *et al.* Synergistic bactericidal effect of ultrasound combined with oregano essential oil nanoemulsion on *Listeria monocytogenes* and its application in blueberry preservation. **Food Control**, [s. l.], v. 165, p. 110619, nov. 2024.
- MACHADO, M. C. de M. M. *et al.* Ultrasound, acetic acid, and peracetic acid as alternatives sanitizers to chlorine compounds for fresh-cut kale decontamination. **Molecules**, [s. l.], v. 27, n. 20, p. 7019, 18 out. 2022.
- MARYAM, A. *et al.* Combined aqueous ozone and ultrasound application inhibits microbial spoilage, reduces pesticide residues and maintains storage quality of strawberry fruits. **Journal of**

- Food Measurement and Characterization**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 1437-1451, 13 abr. 2021.
- MASON, T. J. Sonochemistry and sonoprocessing: the link, the trends and (probably) the future. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 10, n. 4-5, p. 175-179, jul. 2003.
- MELO, J.; QUINTAS, C. Minimally processed fruits as vehicles for foodborne pathogens. **AIMS Microbiology**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 1-19, 13 jan. 2023.
- MENELLI, G. S. *et al.* Effects of high-intensity ultrasonic bath on the quality of strawberry juice. **CYTA – Journal of Food**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2021.
- MURAKONDA, S.; DWIVEDI, M. Combined use of pulse ultrasound-assisted extraction with atmospheric cold plasma: extraction and characterization of bioactive compounds from wood apple shell (*Limonia acidissima*). **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 14, n. 22, p. 28233-28251, 15 nov. 2024.
- NICOLAU-LAPEÑA, I. *et al.* Ultrasound processing alone or in combination with other chemical or physical treatments as a safety and quality preservation strategy of fresh and processed fruits and vegetables: a review. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1452-1471, 15 set. 2019.
- NICOLAU-LAPEÑA, I. *et al.* Exploring thermosonication as non-chemical disinfection technology for strawberries. **European Food Research and Technology**, [s. l.], v. 248, n. 3, p. 671-683, 27 mar. 2022.
- NISHIMOTO-SAUCEDA, D.; ROMERO-ROBLES, L. E.; ANTUNES-RICARDO, M. Biopolymer nanoparticles: a strategy to enhance stability, bioavailability, and biological effects of phenolic compounds as functional ingredients. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 102, n. 1, p. 41-52, 2022.
- OJHA, K. S.; TIWARI, B. K.; O'DONNELL, C. P. Effect of ultrasound technology on food and nutritional quality. *In: Advances*

- in Food and Nutrition Research.** Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc., 2018. v. 84.
- PALUMBO, M. *et al.* Emerging postharvest technologies to enhance the shelf-life of fruit and vegetables: an overview. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 23, p. 3925, jan. 2022.
- PELISSARI, E. M. R. *et al.* Application of chemometrics to assess the influence of ultrasound and chemical sanitizers on vegetables: impact on natural microbiota, Salmonella Enteritidis and physicochemical nutritional quality. **LWT**, [s. l.], v. 148, p. 111711, 2021.
- QIN, D. *et al.* Influence of interactions between bubbles on physico-chemical effects of acoustic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 104, p. 106808, mar. 2024.
- RAJAMANI, A. *et al.* A historical timeline of the development and evolution of medical diagnostic ultrasonography. **Journal of Clinical Ultrasound**, [s. l.], v. 52, n. 9, p. 1419-1437, 3 nov. 2024.
- RAMÍREZ-CORONA, N. *et al.* Effect of combining ultrasound and UVC treatments for processing orange juice and mango nectar on their microbiological, physicochemical, and sensory characteristics. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 94, p. 103686, jun. 2024.
- RATHNAKUMAR, K. *et al.* Applications of ultrasonication on food enzyme inactivation- recent review report (2017–2022). **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 96, p. 106407, 1 jun. 2023.
- RAZOLA-DÍAZ, M. de C. *et al.* Combined effect of pulse electric field and probe ultrasound technologies for obtaining phenolic compounds from orange by-product. **LWT**, [s. l.], v. 198, p. 115950, abr. 2024.
- REJMAN, K. *et al.* Nutritional significance of fruit and fruit products in the average polish diet. **Nutrients**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 2079, jun. 2021.
- ROCHA, C. dos S. *et al.* Emerging technologies in food processing: impacts on sensory characteristics and consumer

- perception. **Current Opinion in Food Science**, [s. l.], v. 47, p. 100892, 1 out. 2022.
- SÃO JOSÉ, J. F. B.; FARIA-SILVA, L.; LEPAUS, B. M. Decontamination of vegetables. In: SHAH, M. A.; MIR, S. A. (eds.). **Microbial decontamination of food**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 71-92.
- SCHIEPPATI, D. *et al.* Characterization of the acoustic cavitation in ionic liquids in a horn-type ultrasound reactor. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 102, p. 106721, jan. 2024.
- SHAIK, L.; CHAKRABORTY, S. Ultrasound processing of sweet lime juice: effect of matrix pH on microbial inactivation, enzyme stability, and bioactive retention. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], 9 dez. 2022.
- SHI, L. *et al.* Extraction and characterization of phenolic compounds and their potential antioxidant activities. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 29, n. 54, p. 81112-81129, 1 nov. 2022.
- SORO, A. B.; GARCIA-VAQUERO, M.; TIWARI, B. K. Equipment and recent advances in ultrasound technology. In: **Innovative and Emerging Technologies in the Bio-marine Food Sector**. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 35-61.
- SUJATHA, C. Fundamentals of acoustics. In: SUJATHA, C. (ed.). **Vibration, acoustics and strain measurement: theory and experiments**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 161-217.
- SUN, Y. *et al.* Use of aqueous ozone rinsing to improve the disinfection efficacy and shorten the processing time of ultrasound-assisted washing of fresh produce. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 83, p. 105931, fev. 2022.
- SUO, G. *et al.* Effects of ultrasonic treatment on color, carotenoid content, enzyme activity, rheological properties, and microstructure of pumpkin juice during storage. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 84, p. 105974, mar. 2022.

- TAHA, A. *et al.* Sonoprocessing: mechanisms and recent applications of power ultrasound in food. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 64, n. 17, p. 6016-6054, 2 jul. 2024.
- TAVARES, W. R.; BARRETO, M. do C.; SECA, A. M. L. Aqueous and ethanolic plant extracts as bio-insecticides—establishing a bridge between raw scientific data and practical reality. **Plants**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 920, 4 maio 2021.
- TURHAN, E. U. *et al.* Investigation of synergistic antibacterial effect of organic acids and ultrasound against pathogen biofilms on lettuce. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 47, p. 101643, jun. 2022.
- UMAIR, M. *et al.* Thermal treatment alternatives for enzymes inactivation in fruit juices: recent breakthroughs and advancements. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 86, p. 105999, 1 maio 2022.
- UMAÑA, M. *et al.* Measurement of microstructural changes promoted by ultrasound application on plant materials with different porosity. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 88, p. 106087, ago. 2022.
- WANG, J. *et al.* Influence of high-intensity ultrasound on bioactive compounds of strawberry juice: profiles of ascorbic acid, phenolics, antioxidant activity and microstructure. **Food Control**, [s. l.], v. 96, p. 128-136, 1 fev. 2019.
- ZHANG, A.-A. *et al.* Pesticide residue elimination for fruits and vegetables: the mechanisms, applications, and future trends of thermal and non-thermal technologies. **Journal of Future Foods**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 223-240, set. 2022.
- ZHOU, S.; CHEN, W.; FAN, K. Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: a review. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 58, p. 103683, abr. 2024.
- ZHOU, W.; SARPONG, F.; ZHOU, C. Use of ultrasonic cleaning technology in the whole process of fruit and vegetable processing. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 18, p. 2874, 16 set. 2022.

ZHU, X. *et al.* Acoustic cavitation for agri-food applications: mechanism of action, design of new systems, challenges and strategies for scale-up. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l], v. 105, p. 106850, maio 2024.

Irradiação de alimentos: desafios, avanços e aplicações

Bárbara Morandi Lepaus • Jackline Freitas Brilhante de São José

Estima-se que aproximadamente um terço da produção mundial de alimentos é perdido antes de chegar à mesa do consumidor (JUNIOR; VITAL, 2021). Quase 25% das perdas de alimentos são causadas por deterioração pós-colheita. Para lidar com esse problema, diversos métodos de conservação de alimentos, sejam físicos, sejam térmicos, sejam não térmicos, são amplamente pesquisados e aplicados com o objetivo de manter a qualidade e a segurança dos produtos (BISHT *et al.*, 2021).

Entre os métodos alternativos testados para a conservação de alimentos, a irradiação destaca-se como uma tecnologia física de processamento e conservação, que utiliza radiação ionizante (como raios gama, feixes de elétrons ou raios-X) ou não ionizante (micro-ondas, UV e infravermelho) para estender a vida útil dos alimentos (BISHT *et al.*, 2021; MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023).

Apesar de ser considerada uma tecnologia nova, a irradiação de alimentos tem uma história que remonta a mais de 100 anos. Embora tenha enfrentado muitos desafios ao longo do tempo, diversos marcos científicos e regulatórios ocorridos ao longo das décadas permitiram

a adoção global dessa tecnologia (FARKAS; MOHÁCSI-FARKAS, 2011). Atualmente, diversos países utilizam a irradiação para aumentar o tempo de vida útil de diversos alimentos.

Ainda assim, é de extrema importância desmistificar algumas questões que dificultam a difusão e aceitação da tecnologia de irradiação pelos consumidores. Ao contrário do que muitos pensam, a irradiação não deixa resíduos nos alimentos e não libera materiais radioativos no meio ambiente. Todo o processo é rigorosamente monitorado para garantir a qualidade do alimento tratado, preservando suas características sensoriais e nutricionais (CELESTINO; GAZOLA ORTIZ; LEVY, 2025), conforme estabelecido pela legislação.

A irradiação é capaz de eliminar microrganismos como parasitas, fungos filamentosos e bactérias, além de larvas de insetos presentes nos alimentos, que consumidos podem transmitir doenças. Além disso, a tecnologia permite inibir ou retardar alguns processos fisiológicos indesejados em hortaliças, como o brotamento e o rápido amadurecimento (JUNIOR; VITAL, 2021). Por ser uma tecnologia altamente versátil, a irradiação pode ser aplicada em um amplo espectro de alimentos como frutas, hortaliças, grãos, carnes e especiarias (BASHIR *et al.*, 2021). Uma das grandes vantagens da irradiação de alimentos é a possibilidade de aplicá-la diretamente no produto embalado. Isso reduz significativamente o risco de recontaminação durante as etapas de transporte, armazenamento e comercialização, garantindo maior segurança e qualidade ao produto final (CELESTINO; GAZOLA ORTIZ; LEVY, 2025).

O presente capítulo visa fornecer informações sobre a evolução, os desafios e as aplicações práticas da irradiação de alimentos, visando apresentar um panorama abrangente dessa tecnologia de modo a permitir compreender sua importância, benefícios e limitações no contexto da conservação e segurança dos alimentos.

História da irradiação em alimentos

Durante a primeira metade do século XX, a irradiação de alimentos era uma questão bastante acadêmica (EHLERMANN, 2016). Esse período, denominado como Era dos Inventores, foi caracterizado por diversas dificuldades enfrentadas nas aplicações práticas da tecnologia (FARKAS; MOHÁCSI-FARKAS, 2011). As invenções de Louis Gillet (1918) e Oskar Wüst (1930) foram marcos importantes no desenvolvimento da tecnologia de irradiação de alimentos, contribuindo para o avanço da aplicação dessa técnica. Em 1918, Gillet registrou uma das primeiras patentes relacionadas ao uso de radiação para conservação de alimentos, propondo a utilização de raios-x para eliminar microrganismos. Em 1930, Wüst desenvolveu um equipamento prático para a irradiação de alimentos, utilizando raios-x, com o objetivo de eliminar microrganismos em alimentos embalados (EHLERMANN, 2016; FARKAS; MOHÁCSI-FARKAS, 2011).

Ainda assim, a aplicação de radiação em alimentos enfrentava desafios para ser aceita, devido ao estigma associado ao uso de tecnologia nuclear, que gerava preocupações e resistência, em razão da associação que existia entre a radioatividade e os possíveis riscos à saúde. Foi em 1953, durante um discurso na Assembleia Geral das Nações Unidas em Nova York, que o presidente Dwight D. Eisenhower anunciou o programa Átomos para a Paz, que mudaria o rumo da história (EHLERMANN, 2016). O programa marcou uma mudança na política global em relação ao uso da energia nuclear e visava aplicações pacíficas da tecnologia em outras áreas, como na medicina, agricultura e geração de energia, em contraste com seu uso militar. O Átomos para a Paz permitiu que as instituições dos Estados Unidos recebessem incentivo para expandir as pesquisas na área da irradiação, incluindo o estudo da aplicação em alimentos.

No final da década de 50, após anos de pesquisas e experimentos, a irradiação começou a ser vista como uma tecnologia promissora para a conservação de alimentos e a redução de perdas pós-colheita.

A Alemanha foi pioneira em adotar comercialmente a tecnologia, utilizando-a para descontaminar especiarias (EHLERMANN, 2016; FARKAS; MOHÁCSI-FARKAS, 2011). No entanto, essa abordagem tornou-se rapidamente obsoleta, pois, no mesmo ano, o país proibiu o uso geral da irradiação em alimentos. Até então, assim como na maioria dos países europeus, a irradiação de alimentos não era regulamentada, o que, na prática, significava que sua utilização para este fim não era permitida (EHLERMANN, 2016).

Contudo, os esforços para promover a aplicação da tecnologia na conservação de alimentos continuavam. O esforço coletivo permitiu que grupos de pesquisa desenvolvessem técnicas que estabeleceram uma base científica sólida para a aplicação dessa tecnologia. Um grande exemplo dessa iniciativa global colaborativa foi o Projeto Internacional no Campo da Irradiação de Alimentos, coordenado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), em parceria com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) e a Organização Mundial da Saúde (OMS). O projeto, que ocorreu entre os anos 1970 e 1982 envolvendo 24 países, foi um marco no desenvolvimento e na promoção da irradiação de alimentos como uma tecnologia segura e eficaz para a preservação e segurança alimentar (FARKAS; MOHÁCSI-FARKAS, 2011; EHLERMANN, 2016).

O período de 1983 a 1984 teve destaque por dois marcos importantes no campo da irradiação de alimentos, estabelecidos pelo *Codex Alimentarius*, um programa conjunto da FAO e da OMS. Esses marcos foram o lançamento do Padrão Geral para Alimentos Irradiados, documento que definiu padrões internacionais para a irradiação de alimentos, estabelecendo critérios de segurança, qualidade e dosagem de radiação; e o Código de Práticas Recomendadas para a Operação de Instalações de Irradiação, visando o fornecimento de diretrizes técnicas e operacionais para a construção, gestão e operação de instalações de irradiação de alimentos (FARKAS; MOHÁCSI-FARKAS, 2011).

Entre 1990 e 1997, foram realizadas diversas reuniões entre a IAEA, a OMS e a FAO para avaliar a segurança e a qualidade dos alimentos irradiados. Após diversas investigações, o Food and Drug Administration (FDA), permitiu finalmente a aplicação de irradiação em alimentos. Em 1993, o FDA aprovou o uso de radiação ionizante pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) para esterilização de alimentos para fins espaciais (BASHIR *et al.*, 2021). Em 1997, chegou-se à conclusão de que os alimentos poderiam ser submetidos à irradiação, desde que respeitados os limites de dose máxima, os quais deveriam ser compatíveis com as propriedades sensoriais e físico-químicas do alimento tratado (BASHIR *et al.*, 2021).

Mais de 50 países aprovaram o uso de irradiação para pelo menos um tipo de alimento ou classe de alimento com uma dose máxima dependente da finalidade da aplicação. Assim, há aplicação para o processamento e conservação de diferentes alimentos, como especiarias, carnes, frutos-do-mar, frutas, vegetais e leguminosas. Além disso, alguns países têm instalações para realizar a irradiação de alimentos. Porém, muitos destes apenas realizam aplicação em reduzidas quantidades de alimentos para fins de pesquisa ou em escala piloto (ROBERTS, 2014; FERREIRA *et al.*, 2017). Nos EUA, a Food and Drug Administration aprovou a irradiação por mais de 50 anos, mas apenas recentemente houve um expressivo crescimento na venda de alimentos irradiados para consumo humano (FERREIRA *et al.*, 2017). A quantidade de alimentos irradiados no mundo em 2005 foi de 405.000 toneladas sendo que foram 46% de especiarias e vegetais secos, 20% grãos e frutas, 8% carne e peixe, 22% alho e batatas e 4% outros alimentos. A China é o principal país que aplica irradiação com 36% do total de alimentos irradiados no mundo (HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ *et al.*, 2019).

Conceitos e aplicações em alimentos

A irradiação é um processo físico de emissão e propagação de energia por meio de fenômenos ondulatórios ou partículas dotadas de energia cinética. Em outras palavras, é a energia que se propaga de um ponto a outro no espaço ou em um meio específico. A irradiação de alimentos é um método físico, não térmico e não químico de conservação de alimentos, no qual o alimento pode ser exposto a fontes de radiações ionizantes e não ionizantes, classificada considerando se ela ioniza ou não os átomos, ou moléculas do material submetido ao tratamento (BISHT *et al.*, 2021; SEBRANEK; DIKEMAN; DEVINE, 2014).

O tratamento recebido pelo alimento é caracterizado pela dose de irradiação, a qual é a quantidade de energia absorvida pelo alimento, quando ele é exposto à irradiação. A unidade internacional de medida é o Gray (Gy) ou quilogray (kGy). Um Gray representa um joule de energia absorvida por quilograma de produto irradiado (SRUTHI *et al.*, 2023). A técnica para medir a dose de irradiação é conhecida como dosimetria. A medição da dose absorvida deve ser realizada com a maior precisão possível, estabelecendo procedimentos corretos para a conservação de alimentos e controle de qualidade no processamento por irradiação (SRUTHI *et al.*, 2023).

Radiação ionizante

A irradiação ionizante é aquela que possui energia suficiente para remover elétrons dos átomos ou moléculas, criando íons (átomos ou moléculas carregados eletricamente). Três tipos principais de fontes de radiação ionizante são comumente usados e estão apresentados na Tabela 1, sendo eles os raios gama (γ), raios-x e feixe de elétrons (E-beam).

A eficácia da aplicação é determinada pela natureza desses tipos de radiação ionizante, composição do meio, teor de umidade, presença ou ausência de oxigênio, dose absorvida, densidade do alimento e espessura do alimento (HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ *et al.*, 2019).

Os raios de radiações gama, que apresentam alta penetração e são homogêneas, apresentam boa penetração em tecidos, condição favorável que permite que alimentos embalados sejam submetidos ao tratamento. Diferente do cézio-137, o uso de cobalto-60 requer menor quantidade para ser aplicado (SRUTHI *et al.*, 2023). Além disso, por ser insolúvel em água, apresenta baixo ou nenhum risco ambiental, características que o tornam amplamente utilizado na irradiação de alimentos e adequado para diversos tipos de produtos (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023).

Os raios-x são produzidos ao refletir um feixe de elétrons de alta energia em um alvo metálico, possuindo alto poder de penetração. Sua fonte de irradiação não provém de uma substância radioativa e pode ser desligada quando não está em uso. Essas características facilitam a instalação direta em linhas de processamento comercial, tornando-os altamente aplicáveis em escala industrial. No entanto, o alto custo de implementação é um dos principais desafios e desvantagens dessa técnica (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023; SRUTHI *et al.*, 2023).

Assim como os raios-x, a fonte de irradiação do feixe de elétrons não provém de substâncias radioativas. Trata-se de um fluxo de elétrons de alta energia, gerado por um acelerador de elétrons, que pode ser desligado quando não está em uso. O feixe de elétrons é econômico, capaz de gerar radiação sob demanda, e é adequado para aplicações que exigem altas doses e elevado fluxo de radiação. No entanto, possui baixa profundidade de penetração, limitando o seu uso em certos tipos de produtos ou embalagens que são mais espessas (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023; SRUTHI *et al.*, 2023).

Tabela 1: Principais fontes de radiação ionizante utilizadas para conservação de alimentos

Tipo	Fonte	Aplicações	Características
Raios Gama	Isótopos radioativos: Cobalto-60 (Co-60) e Césio-137 (Cs-137)	Esterilização de especiarias e condimentos; Controle de insetos em grãos e frutas; Redução de patógenos em carnes e frutos-do-mar.	Vantagens: Alto poder penetrante e eficiência; Desvantagens: Alto custo da fonte radioativa; necessita controle rigoroso.
Raios-x	Bombardeamento de um alvo metálico, como o tungstênio, com elétrons de alta energia	Controle de pragas em frutas e grãos; Redução de patógenos em carnes, frutos-do-mar e produtos lácteos.	Vantagens: Alta penetração, tratamento de maior volume. Desvantagens: Alto custo de instalação e operação.
Feixe de Elétrons	Aceleradores de elétrons que geram partículas de alta energia	Descontaminação de carnes, frutos-do-mar e vegetais frescos; Esterilização de embalagens e ingredientes secos.	Vantagens: Processo rápido, ausência de resíduos radioativos. Desvantagens: Baixa penetração, limitado a camadas superficiais.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em qualquer tipo de irradiação, a dose aplicada depende de diversos fatores, incluindo o tipo da radiação, a intensidade, o tempo de exposição e as características do alimento tratado. Além disso, pode variar conforme o comportamento do material irradiado, considerando sua capacidade de absorção e as possíveis modificações químicas, físicas e biológicas, bem como reações secundárias (DIONÍSIO *et al.*, 2009; ROSTAMABADI *et al.*, 2023). A finalidade da irradiação, seja para inativação de microrganismos e enzimas, seja para desinfecção de insetos, seja para inibição da germinação de hortaliças, também influencia a dose necessária, uma vez que diferentes materiais apresentam graus variados de sensibilidade à radiação. Por isso, a dosagem deve ser ajustada para garantir a eficácia do tratamento (BHATNAGAR *et al.*, 2022; YANGET *et al.*, 2024).

A radiação ionizante para produtos alimentícios pode variar de doses extremamente baixas como 0,05 kGy, usada para inibir o brotamento de tubérculos, até 44 kGy, aplicada para esterilização de produtos alimentícios, como alimentos preparados pela NASA para viagens espaciais (SEBRANEK; DIKEMAN; DEVINE, 2014). De maneira mais ampla, o uso da radiação ionizante na conservação de alimentos emprega três abordagens distintas, que variam conforme a dose aplicada, sendo elas:

1. Doses baixas (≤ 1 kGy): utilizadas para inibir a germinação de bulbos e tubérculos e retardar o amadurecimento de frutas;
2. Doses médias (1–10 kGy): aplicadas para reduzir patógenos nos alimentos e estender o prazo de validade;
3. Doses altas (10 a 50 kGy): destinadas à destruição completa de microrganismos e à esterilização dos alimentos;

Para facilitar a compreensão, essas faixas de doses receberam nomes comerciais com base em suas funções específicas. Elas podem ser denominadas como Radurização, Radicidação ou Radapertização (RAMOS; BATISTA, 2023), que serão brevemente descritas a seguir.

Na radurização são aplicadas doses menores que 1 kGy, na qual o objetivo é inibir brotamentos em alimentos como batata, cebola,

alho, além de retardar o período de maturação em frutas, reduzir deterioração fúngica em frutas e hortaliças e controlar a infestação por insetos e ácaros em cereais, farinhas e frutas (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023). Todas essas aplicações visam aumentar a vida de prateleira dos produtos e, consequentemente, as possibilidades de comercialização e maximização da renda, tanto por parte dos produtores como por parte dos comerciantes.

Já a radicação é o tratamento de irradiação utilizado para reduzir o nível de patógenos não formadores de esporos, fungos e leveduras não formadores de esporos a um nível indetectável, reduzindo, assim, o risco de doenças transmitidas por alimentos a quase zero. Doses médias de radiação (1 kGy – 10 kGy) podem ser aplicadas em alimentos que são usualmente pasteurizados, além de produtos como carnes, frutos-do-mar e ovos com casca. Contudo, eles devem ser armazenados a temperaturas menores ou igual a 4 °C, para evitar a formação de esporos (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023).

Por fim, a radapertização é o nível mais alto de doses de radiação aplicada em alimentos, geralmente com doses acima de 10 kGy, com o objetivo de eliminar patógenos formadores de esporos. Altas doses são aplicadas para obter a esterilidade de produtos agrícolas e a estabilidade na prateleira. Por esse motivo, é comumente testada em carne congelada e embalada (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023).

Radiação não ionizante

A radiação não ionizante é aquela que não possui energia suficiente para remover elétrons dos átomos ou moléculas, ou seja, não causa ionização. Trata-se de uma forma de energia gerada por fontes como máquinas ou instrumentos, que se propaga no espaço na forma de ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda específicos. Diferente da forma ionizante, a radiação não ionizante possui aplicações mais limitadas na conservação de alimentos, devido ao seu menor

poder de penetração (ASWAL; CHANDRA, 2024). Por esse motivo, é comumente utilizada para processos térmicos e de desinfecção superficial. Alguns exemplos de radiação não ionizantes são o infravermelho, o micro-ondas e a radiação ultravioleta (UV), que possuem ondas eletromagnéticas de menor energia. Essas radiações são caracterizadas por comprimentos de onda longos (>100 nm) e baixa energia dos fótons ($<12,4$ eV) (BISHT *et al.*, 2021).

A radiação infravermelha é uma forma de radiação eletromagnética emitida por fontes de calor, como lâmpadas térmicas, que não requerem um meio para se propagar. Localizada na faixa do espectro eletromagnético logo após a luz vermelha visível, o infravermelho possui comprimentos de onda entre 700 nm e 1 mm, situando-se entre a luz visível e as micro-ondas. Essa radiação é comumente associada ao calor, pois é emitida por corpos quentes (HUANG *et al.*, 2021), e pode ser altamente versátil, podendo ser aplicada em processos que necessitam de calor como secagem, descongelamento, torrefação. O infravermelho pode ser dividido em três categorias: infravermelho próximo (NIR: 0,78 a 1,40 μm), infravermelho médio (MIR: 1,40 a 3,00 μm) e infravermelho distante (FIR: 3,00 a 1000 μm) (CORA JOFRE; SAVIO, 2024).

As micro-ondas são uma fonte de irradiação não ionizante, com frequências entre 300 MHz e 30 GHz, situadas entre o infravermelho e as ondas de rádio no espectro eletromagnético. As ondas eletromagnéticas de energia penetram na matriz do alimento durante o tratamento, causando uma vibração molecular e gerando calor por meio do atrito interno. O campo de micro-ondas inverte sua polaridade milhões de vezes por segundo, fazendo com que uma quantidade significativa de energia cinética seja gerada e transferida a outras moléculas por meio de colisões, podendo causar mudanças no alimento tratado e melhorar parâmetros tecnológicos de amidos, por exemplo (ROSTAMABADI *et al.*, 2023).

Já a aplicação de radiação UV para o processamento de alimentos varia entre 100 e 400 nm. Esse espectro é categorizado em 4 tipos,

de acordo com a faixa do comprimento de ondas, sendo eles: UV-A: 315 e 400 nm; UV-B: 280 e 315 nm; UV-C: 200 e 280 nm; e UV-V: 100 e 200 nm (BISHT *et al.*, 2021). Uma vez que a maioria das proteínas que contêm aminoácidos aromáticos e ácidos nucleicos absorve a luz desse comprimento de onda específico, a radiação UV pode ser usada como germicida em alimentos. Em 2000, a FDA afirmou que o tratamento com UV poderia destruir microrganismos patogênicos em sucos de frutas e afirmou que o tratamento era totalmente seguro (SRUTHI *et al.*, 2023). No entanto, a eficiência do tratamento depende de vários fatores, como o tempo de exposição à radiação UV, o comprimento de onda, a dose e a fonte de luz da radiação. Essa técnica está descrita em mais detalhes no capítulo 6.

Mecanismos de inativação microbiana

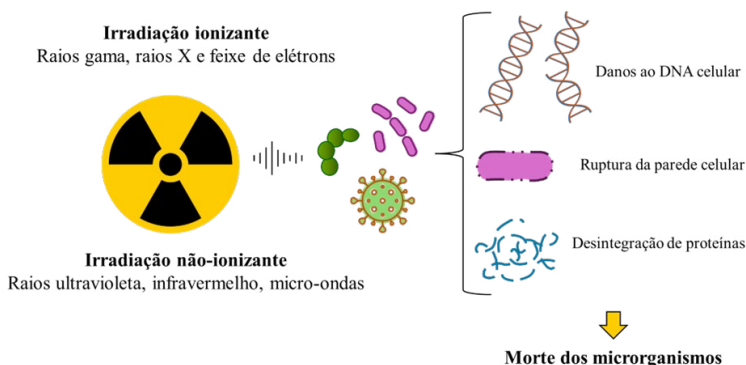
A inativação de microrganismos presentes nos alimentos utilizando a irradiação é um processo que combina princípios físicos e químicos, a partir de efeitos diretos e indiretos da aplicação, que podem variar dependendo do tipo de irradiação aplicada. No efeito direto, essas radiações induzem diretamente a destruição de componentes celulares microbianos como lipídios, carboidratos e DNA. No caso de efeito indireto, radicais livres e espécies reativas, incluindo radicais hidroxila, átomos de hidrogênio e elétrons hidratados da radiólise da água, interagem com componentes celulares. O resultado dos efeitos indiretos e diretos é a ocorrência de alterações fisiológicas, genéticas, epigenéticas e biológicas (BHATNAGAR *et al.*, 2022).

Por exemplo, quando as moléculas absorvem energia ionizante, proveniente de raios gama ou X, ocorre a formação de íons e radicais livres que reagem para formar outros produtos radiolíticos. Como consequência ocorre o rompimento de ligações químicas, que alteram compostos e estruturas importantes para o metabolismo celular (SEBRANEK; DIKEMAN; DEVINE, 2014). No geral, ácidos nucléicos

e lipídios de membrana são o foco da irradiação, sendo estes alterados e desintegrados, afetando funções celulares, como permeabilidade de membrana e funcionamento de enzimas. Essas radiações também podem causar mudanças na estrutura do DNA, interrompendo a replicação e outras funções celulares. Algumas bactérias têm um mecanismo de autorreparo que as torna resistentes a algumas doses de radiação. Esse tipo de eficiência de reparo de danos ao DNA varia com diferentes bactérias, como por exemplo, *Pseudomonas* sendo a mais sensível e *Deinococcus* é a mais resistente. Leveduras e esporos multicelulares de fungos dos gêneros *Alternaria*, *Fusarium*, *Aspergillus* e *Penicillium* são considerados mais resistentes, sendo necessária a aplicação de doses maiores de radiação para destruir os microrganismos (SRINIVASA *et al.*, 2023).

Na irradiação não ionizante, também ocorre comprometimento das ligações químicas como resultado da aplicação de energia. O primeiro efeito observado é a lesão ou recombinação do DNA, impedindo a multiplicação celular e inibindo funções celulares vitais. Além de afetar o DNA, a radiação UV, por exemplo, também reage com o material genético, danificando outros componentes celulares, como membranas, enzimas e o citoplasma. A inativação por UV ocorre principalmente pela formação de lesões ou dímeros de pirimidina, que interferem diretamente na replicação do material genético (BISHT *et al.*, 2021). Todos esses efeitos resultam na inativação de microrganismos, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1: Esquema de inativação microbiana pela aplicação de diferentes fontes de irradiação



Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim como para outros processos de conservação, a eficácia do processo depende de diversos fatores como o tipo de radiação e a dose aplicada, a natureza do alimento e o microrganismo-alvo. Outros fatores intrínsecos e extrínsecos, como maior ou menor presença de oxigênio, água e temperatura também podem afetar o processo de irradiação (BHATNAGAR *et al.*, 2022; BISHT *et al.*, 2021). Alguns microrganismos possuem maior sensibilidade à irradiação. Bactérias e fungos são, em geral, menos resistentes, enquanto os vírus e os esporos bacterianos são os mais resistentes, exigindo doses mais altas de irradiação (BOSCH *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2024).

Irradiação e impacto nas características dos alimentos

A irradiação de alimentos é uma tecnologia altamente eficaz para inativar microrganismos, incluindo bactérias, vírus, fungos e parasitas, contribuindo significativamente para a segurança dos alimentos e a extensão da vida útil dos produtos (YANG *et al.*, 2024). No entanto,

uma das maiores preocupações em aplicar tecnologias de processamento, incluindo a irradiação, é a capacidade em manter parâmetros de qualidade, como cor, sabor e aroma, além dos nutrientes.

Os micronutrientes, especialmente as vitaminas, podem ser mais suscetíveis a tratamentos de conservação e processamento, pois muitas delas são termossensíveis (sensíveis ao calor) ou fotossensíveis (sensíveis à luz). Além disso, fatores como a presença de oxigênio e mudança de pH durante o processamento podem impactar o conteúdo de vitaminas, principalmente a vitamina C, que é altamente sensível à oxidação (BHATNAGAR *et al.*, 2022). Por esse motivo, diversos pesquisadores têm avaliado diferentes fontes de irradiação para o processamento e a conservação de vários tipos de alimentos.

Camargo *et al.* (2011) realizaram um extenso estudo sobre o efeito da aplicação de radiação gama (5 a 15 kGy) em diversos parâmetros de amendoim. Não foram observadas diferenças significativas na cor das amostras. Em relação aos compostos fenólicos totais, houve um aumento significativo após os tratamentos. Além disso, a capacidade antioxidante não foi afetada pela aplicação da dose mais alta, recomendada para a eliminação fúngica do amendoim. Na dose de 10,0 kGy, observou-se uma redução nos ácidos graxos saturados, um aumento nos ácidos graxos insaturados e um aumento no ácido linoleico.

Robichaud *et al.* (2021) aplicaram radiação gama (0 a 10 kGy) utilizando como fonte cobalto-60, em fórmulas infantis. Os autores não avaliaram o impacto nas características sensoriais e nutricionais, mas concluíram que as condições testadas foram capazes de reduzir populações microbianas de *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* O157:H7, e *Salmonella* Typhimurium, importantes patógenos de interesse alimentar.

Yeom *et al.* (2024) investigaram a aplicação da irradiação de raios-x (0,5 a 10 kGy) na inativação de patógenos e parâmetros de qualidade de costeletas de porco. Os valores D10, dose de radiação necessária para reduzir em 90% (1 log10) a população de um microrganismo, foram 0,37, 0,62, 0,52 e 0,36 kGy para *Escherichia coli* O157:H7,

Salmonella Typhimurium, *Listeria monocytogenes* e *Staphylococcus aureus*, respectivamente. Além disso, a irradiação reduziu de forma dependente da dose todas as contagens microbianas, ou seja, maiores doses de raios-x resultaram em uma maior redução dos microrganismos. Em relação aos demais parâmetros avaliados, doses de até 7 kGy, não causaram impactos negativos na cor, pH e níveis de oxidação lipídica das amostras.

Visuthiwan e Assatarakul (2021) submeteram suco de lichia a diferentes doses de radiação UV (0 a 74,88 J/cm²) e avaliaram parâmetros ao longo do armazenamento refrigerado. Não foram observadas diferenças significativas no pH, sólidos solúveis totais e acidez titulável em comparação com a amostra controle e a pasteurizada (85 °C, 15 s). Em relação aos compostos fenólicos, flavonoides totais e capacidade antioxidante, os tratamentos de irradiação conservaram essas características em relação à amostra não tratada, diferente da amostra pasteurizada, sem alterar a cor das amostras. Além disso, os tratamentos com irradiação UV estenderam a vida de prateleira em 7 dias, comparado à amostra sem tratamento.

As propriedades físico-químicas e nutricionais da polpa de coco submetida a tratamento por micro-ondas para conservação foram investigadas por Alam *et al.* (2024). O objetivo do estudo foi preservar o produto em soluções osmóticas, tratando-o com micro-ondas e fervura convencional, para que pudesse ser comercializado sob refrigeração. O tratamento com uma solução de açúcar a 80% foi considerado eficaz para a preservação da polpa de coco, pois demonstrou excelente estabilidade nutricional (manutenção de compostos fenólicos e capacidade antioxidante), manteve parâmetros de qualidade, como a cor, durante o armazenamento, e obteve boa aceitação sensorial.

Ainda, outro aspecto interessante da aplicação da irradiação é a possibilidade desta tecnologia auxiliar no controle de alérgenos em alimentos. De acordo com Pi *et al.* (2021), a irradiação é uma tecnologia promissora que pode efetivamente auxiliar no controle da alergenicidade dos alimentos devido à destruição de estruturas de alérgenos

alimentares. Esse controle pode ocorrer de maneira direta ou indireta. No primeiro caso, a energia da irradiação é absorvida pelos alérgenos e causa mudança da estrutura da proteína, resultando na destruição dos epítomos do gene da alérgenos e na redução da alergenidade. Enquanto de maneira indireta é os grupos reativos gerados pela radiólise da água causam oxidação, desoxidação e descarboxilação provocando mudança da estrutura da proteína, destruição de epítomos do gene da alérgenos, promovendo redução da alergenidade (PI *et al.*, 2021).

Assim como outras tecnologias de processamento, a irradiação de alimentos pode provocar alterações na estrutura química dos alimentos e alterar a composição e o valor nutricional (CHAUDHARY; SHARMA, 2024). No entanto, uma de suas principais vantagens é que essas alterações são minimizadas em comparação a outros métodos. As vitaminas apresentam diferentes níveis de estabilidade à irradiação (BHATNAGAR *et al.*, 2022). No entanto, é importante destacar que a perda de vitaminas também ocorre em outros métodos de conservação, como o cozimento e a esterilização térmica, e não é exclusiva da irradiação (KESAVAN *et al.*, 2023; SONI; BRIGHTWELL, 2022).

As alterações observadas nos nutrientes dos alimentos irradiados são influenciadas por diversos fatores, como a dose de irradiação, a composição do alimento, o tipo de embalagem e as condições de processamento (temperatura e saturação atmosférica de oxigênio) (BHATNAGAR *et al.*, 2022). Apesar de a irradiação ser uma das técnicas de conservação que causa menos danos aos componentes dos alimentos, algumas reduções no conteúdo de vitaminas podem ocorrer, dependendo das condições aplicadas. No entanto, em geral, tratamentos com irradiação de baixa dose não causam alterações significativas nos teores de vitaminas, preservando a qualidade nutricional do produto (YANG *et al.*, 2024).

Essa técnica deve ser considerada devido à sua eficiência e menor impacto na qualidade dos alimentos em comparação com métodos tradicionais, como o cozimento e a esterilização térmica. Além

disso, a irradiação é capaz de eliminar microrganismos patogênicos e estender a vida útil dos alimentos sem a necessidade de aditivos químicos, o que a torna uma alternativa sustentável e segura para a indústria alimentícia.

Considerando todo o exposto nesta seção, é de extrema importância destacar que a irradiação de alimentos é uma ferramenta poderosa para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Os ODS consistem em um conjunto de 17 metas globais a serem atingidas até 2030. Segundo ASWAL; CHANDRA (2024), o uso da irradiação está alinhado a vários desses objetivos, como erradicação da pobreza (ODS 1); fome zero e agricultura sustentável (ODS 2); saúde e bem-estar (ODS 3); educação de qualidade (ODS 4); água potável e saneamento (ODS 6); energia limpa e acessível (ODS 7); trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8); indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9); cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11); ação contra a mudança global do clima (ODS 13); vida na água (ODS 14); vida terrestre (ODS 15); e paz, justiça e instituições eficazes (ODS 16).

De maneira geral, a tecnologia de irradiação pode ser aplicada para melhorar a disponibilidade de alimentos, reduzir o desperdício e promover a saúde pública por meio da eliminação de patógenos. Além disso, ao diminuir o desperdício de alimentos, a irradiação contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, demonstrando como uma única tecnologia pode impactar múltiplos ODS de forma integrada e sustentável (ASWAL; CHANDRA, 2024).

Aceitação e aspectos de segurança

Apesar de suas inúmeras vantagens, a aplicação de radiação em alimentos ainda enfrenta diversos desafios, seja devido ao desconhecimento dos consumidores, seja com receio de possíveis efeitos adversos associados ao consumo de alimentos irradiados. Um dos principais

obstáculos para o desenvolvimento dessa técnica em muitos países são os conceitos equivocados que alguns consumidores têm, como a crença em perdas excessivas de nutrientes, o mito de que os alimentos se tornam radioativos e a geração de compostos tóxicos nos alimentos (RAVINDRAN; JAISWAL, 2019; BHATNAGAR *et al.*, 2022).

Pesquisadores investigaram a percepção de 1004 participantes quanto à aplicação de irradiação em alimentos. Alimentos tratados com UV foram mais frequentemente associados a palavras/termos desconhecidos (21,51%) e a associações negativas (36,25%) do que as positivas (29,89%), principalmente entre pessoas com idade menor ou igual a 35 anos e renda baixa e média (MONTEIRO *et al.*, 2022).

Kydyrbekova *et al.* (2024) investigaram as perspectivas dos consumidores do Cazaquistão em relação aos alimentos irradiados por radiação ultravioleta (UV), especificamente frutas e hortaliças. Do total de participantes (n=584), aproximadamente 50,9% demonstraram não ter conhecimento sobre o uso da irradiação UV como uma tecnologia de preservação de alimentos. Em relação aos fatores que impactaram a aceitação da irradiação UV pelos consumidores, os participantes destacaram o custo, a segurança e o conhecimento limitado como os principais determinantes para a adoção da tecnologia.

Outro recente estudo, realizado com militares e civis da Marinha do Brasil, aplicou um questionário para avaliar o conhecimento e a aceitação da irradiação de alimentos entre os participantes. Os resultados mostraram que, antes de receberem informações, 54% dos participantes desconheciam a tecnologia, e 28% tinham uma visão negativa sobre a irradiação. No entanto, após a exposição a materiais informativos, 82% dos participantes expressaram disposição para consumir alimentos irradiados (CELESTINO; GAZOLA ORTIZ; LEVY, 2025).

Buczowska *et al.* (2023) avaliaram a atitude dos consumidores poloneses em relação à irradiação de alimentos como um dos métodos de conservação de alimentos e constaram um baixo nível de conhecimento sobre irradiação de alimentos: 90,31% (n = 550) dos entrevistados nunca tinham ouvido falar desse método. Ao fornecer

material informativo sobre o método de conservação, houve aumento do número de entrevistados com atitude positiva em relação à irradiação de alimentos. Além disso, os materiais educacionais tiveram um impacto significativo no interesse dos consumidores em comprar alimentos irradiados alcançando 59,30% (n = 361) dos entrevistados.

É notável que os resultados das pesquisas demonstram a importância de expandir e divulgar a tecnologia, reforçando a necessidade de educação e comunicação para aumentar a aceitação da irradiação entre a população.

Outra das grandes preocupações dos consumidores quanto à irradiação de alimentos é a possível formação de compostos tóxicos. Neste contexto, é importante que algumas questões sejam destacadas. Embora as espécies reativas geradas pela irradiação de alimentos resultem em aumento da segurança e da vida útil, elas também podem reagir com alguns componentes químicos dos alimentos, gerando produtos radiolíticos (RAVINDRAN; JAISWAL, 2019). Os produtos radiolíticos são compostos químicos formados quando a radiação ionizante interage com componentes presentes nos alimentos, como água, lipídios, proteínas e carboidratos. Esses produtos são resultantes da quebra das moléculas pela energia da radiação e podem variar dependendo do tipo de alimento e da dose de irradiação aplicada (RAVINDRAN; JAISWAL, 2019).

As substâncias formadas não são exclusivas dos alimentos irradiados e nem sempre são nocivas. Muitas delas são encontradas naturalmente nos alimentos ou produzidas por reações químicas durante processos naturais. Alguns exemplos de produtos radiolíticos incluem hidrocarbonetos de cadeia curta e ácidos graxos livres, formados a partir da hidrólise de lipídeos; aminoácidos livres, resultantes da hidrólise de proteínas; e açúcares simples e ácidos orgânicos, provenientes da degradação de carboidratos (RAVINDRAN; JAISWAL, 2019). Embora alguns possam ser indesejáveis, a irradiação é considerada segura quando aplicada dentro dos limites estabelecidos, garantindo a segurança e a qualidade dos alimentos.

Regulamentação

No Brasil, a Resolução da Diretoria Colegiada, RDC nº 21 de janeiro de 2001, publicada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), estabelece as normas e procedimentos para o uso da irradiação em alimentos no país. Segundo a Resolução, irradiação é um “processo físico de tratamento que consiste em submeter o alimento, já embalado ou a granel, a doses controladas de radiação ionizante, com finalidades sanitária, fitossanitária e tecnológica”. A Resolução estabelece os limites máximos de dose de radiação que podem ser aplicados a cada tipo de alimento, variando conforme a finalidade de aplicação (ex.: controle de microrganismos, inibição de brotação, desinfestação). A dose mínima aplicada deve ser alta o suficiente para alcançar a finalidade desejada, e a dose máxima deve ser capaz de manter as propriedades funcionais e atributos sensoriais do alimento (BRASIL, 2001).

Segundo os órgãos regulamentadores, a indústria, ao utilizar a irradiação em alimentos, deve assegurar que o consumidor final seja informado sobre o tratamento, deixando isso claro na embalagem. Para tanto, existe o símbolo internacional da Radura, que deve ser apresentado juntamente com as declarações como “Alimento tratado por irradiação”, “Alimento irradiado”, “Tratado com irradiação” ou “Tratado por irradiação”. Contudo, se o produto irradiado for utilizado para o preparo de outro alimento, por exemplo, temperos em carne processada, o produto final poderá não apresentar as informações sobre a irradiação (SEBRANEK; DIKEMAN; DEVINE, 2014). A Radura apresenta uma estrutura semelhante a uma planta em um círculo, geralmente verde. A imagem da planta simboliza os produtos agrícolas, enquanto as linhas tracejadas na parte superior representam a penetração da radiação ionizante (MSHELIA; DIBAL; CHIROMA, 2023).

Considerações finais

Neste capítulo, foram abordados aspectos relacionados à irradiação de alimentos, desde suas primeiras aplicações, os desafios enfrentados, os obstáculos superados e as aplicações práticas da tecnologia. A irradiação de alimentos, seja com fontes ionizantes, seja com não ionizantes, é uma tecnologia altamente eficaz para a conservação de alimentos, contribuindo para a melhoria da qualidade nutricional e sensorial dos produtos, além de reduzir o desperdício. Considerando a Agenda 2030 da ONU e os ODS propostos, a irradiação de alimentos alinha-se diretamente com diversos desses objetivos. Diversos estudos investigaram e comprovaram a eficiência da irradiação, tanto na eliminação de microrganismos e na desinfestação de insetos quanto na manutenção de características sensoriais e nutricionais. No entanto, sua aplicação em larga escala ainda enfrenta desafios, como custos elevados e a baixa aceitação por parte dos consumidores, devido ao conhecimento limitado sobre os benefícios da irradiação de alimentos. Por esse motivo, é fundamental que pesquisas continuem sendo realizadas para reduzir a neofobia alimentar em relação a produtos irradiados, especialmente considerando que a tecnologia já é amplamente aplicada em diversos contextos. Embora não tenha sido detalhado no presente capítulo, vale ressaltar que a irradiação pode ser combinada com outros métodos físicos ou químicos para otimizar seus efeitos. Em síntese, a irradiação de alimentos representa uma solução promissora e alinhada às demandas globais por sustentabilidade e segurança dos alimentos.

Referências

ALAM, M. *et al.* The influence of microwave-assisted osmotic dehydration in coconut meat preservation technique. **Applied Food Research**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 100448, dez. 2024.

- ASWAL, D. K.; CHANDRA, A. Ionizing Radiation for Inclusive Growth. In: ASWAL, D. K. (ed.). **Handbook on Radiation Environment, Volume 1**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 1-24.
- BASHIR, K. *et al.* History, status and regulatory aspects of gamma irradiation for food processing. In: **Innovative Food Processing Technologies**. [S. l.]: Elsevier, 2021. p. 101-107.
- BHATNAGAR, P. *et al.* Impact of irradiation on physico-chemical and nutritional properties of fruits and vegetables: a mini review. **Heliyon**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. e10918, out. 2022.
- BISHT, B. *et al.* Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 114, p. 372-385, ago. 2021.
- BOSCH, A. *et al.* Foodborne viruses: detection, risk assessment, and control options in food processing. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], v. 285, p. 110-128, nov. 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 21, de 26 de janeiro de 2001. Aprova o Regulamento Técnico para Irradiação de Alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 jan. 2001. Seção 1, p. 45-46. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2001/rdc0021_26_01_2001.html. Acesso em: 5 mar. 2025.
- CAMARGO, A. C. de *et al.* Efeitos da radiação gama na cor, capacidade antioxidante e perfil de ácidos graxos em amendoim (*Arachis hypogaea* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 11-15, mar. 2011.
- CELESTINO, P. A.; ORTIZ, R. G.; LEVY, D. Food Irradiation: a solution for the conservation and safety of perishable foods in naval environments by the Brazilian Navy. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 4A (Suppl.), p. e2717, 20 jan. 2025.

- CHAUDHARY, N.; SHARMA, A. Materials modifications by radiation technology. In: ASWAL, D. K. (ed.). **Handbook on Radiation Environment, Volume 1**: sources, applications and policies. Singapore: Springer Nature, 2024. p. 265-294.
- CORA JOFRE, F.; SAVIO, M. Infrared radiation: a sustainable and promising sample preparation alternative for inorganic analysis. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 170, p. 117469, jan. 2024.
- DIONÍSIO, A. *et al.* Ionizing radiation effects on food vitamins – a review. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 1267-1278, 2009.
- EHLERMANN, D. A. E. The early history of food irradiation. **Radiation Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 129, p. 10-12, dez. 2016.
- FARKAS, J.; MOHÁCSI-FARKAS, C. History and future of food irradiation. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 22, n. 2-3, p. 121-126, mar. 2011.
- FERREIRA, I. C. F. R.; ANTONIO, A. L.; VERDE, S. C. **Food Irradiation Technologies**: concepts, applications and outcomes. [S. l.]: Royal Society of Chemistry, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/9781788010252>.
- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, H. M.; MORENO-VILET, L.; VILLANUEVA-RODRÍGUEZ, S. J. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: novel non-thermal processing. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 58, p. 102233, 2019.
- HUANG, D. *et al.* Application of infrared radiation in the drying of food products. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 110, p. 765-777, abr. 2021.
- JUNIOR, M. F.; VITAL, H. de C. **Irradiação**. 2025. Disponível em: <https://www.Embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/tipos-de-processos/irradiacao>. Acesso em: 4 mar. 2025.

- KESAVAN, R. K. *et al.* Hurdle effect of thermosonication and non-thermal processing on the quality characteristics of fruit juices: an overview. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 46, n. 6, p. e14310, 2023.
- KYDYRBEKOVA, A. *et al.* Exploring the nexus of innovation management, ultraviolet irradiation, and business scale: implications for sustainable fruit and vegetable preservation during the COVID-19 era. **Journal of Innovation and Entrepreneurship**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 19, 7 mar. 2024.
- MONTEIRO, M. L. G. *et al.* What do consumers think about foods processed by ultraviolet radiation and ultrasound? **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 434, 1 fev. 2022.
- MSHELIA, R. D.; DIBAL, N. I.; CHIROMA, S. M. Food irradiation: an effective but under-utilized technique for food preservations. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 60, n. 10, p. 2517-2525, 13 out. 2023.
- PI, X. *et al.* Food irradiation: a promising technology to produce hypoallergenic food with high quality. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 27, p. 1-16, 2021.
- RAMOS, R.; BATISTA, E. V. Irradiação de alimentos: revisão comparativa, histórica e difusão do processo. **Brazilian Journal of Science**, [s. l.], v. 2, n. 8, p. 94-103, 2023.
- RAVINDRAN, R.; JAISWAL, A. K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 285, p. 363-368, jul. 2019.
- ROBERTS, P. B. Food irradiation is safe: half a century of studies. **Radiation Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 105, p. 78-82, 2014.
- ROBICHAUD, V. *et al.* Effect of γ -irradiation and food additives on the microbial inactivation of foodborne pathogens in infant formula. **LWT**, [s. l.], v. 139, p. 110547, mar. 2021.
- ROSTAMABADI, H. *et al.* Ionizing and nonionizing radiations can change physicochemical, technofunctional, and nutritional

- attributes of starch. **Food Chemistry: X**, [s. l.], v. 19, p. 100771, out. 2023.
- SEBRANEK, J. G.; DIKEMAN, M.; DEVINE, C. E. Irradiation. *In: Encyclopedia of Meat Sciences*. [S. l.]: Elsevier, 2014. p. 140-144.
- SHARMA, P. *et al.* Mechanism of microbial spore inactivation through electromagnetic radiations: a review. **Journal of Future Foods**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 324-334, dez. 2024.
- SONI, A.; BRIGHTWELL, G. Effect of hurdle approaches using conventional and moderate thermal processing technologies for microbial inactivation in fruit and vegetable products. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 1811, jan. 2022.
- SRINIVASA, U. M.; SRUTHI, P.; RASTOGI, N. K.; NAIDU, M. M. Application of irradiation in the food industry. *In: JAFARI, S. M.; THERDTHAI, N. (eds.). Non-thermal food processing operations*. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2023. p. 221-253.
- SRUTHI, P. *et al.* Principles of irradiation and its equipment. *In: Non-thermal Food Processing Operations*. [S. l.]: Elsevier, 2023. p. 205-220.
- VISUTHIWAN, S.; ASSATARAKUL, K. Kinetic modeling of microbial degradation and antioxidant reduction in lychee juice subjected to UV radiation and shelf life during cold storage. **Food Control**, [s. l.], v. 123, p. 107770, maio 2021.
- YANG, J. *et al.* Food irradiation: an emerging processing technology to improve the quality and safety of foods. **Food Reviews International**, [s. l.], v. 40, n. 8, p. 2321-2343, 16 nov. 2024.
- YEOM, S. *et al.* Effects of X-ray irradiation on pathogen inactivation, quality changes, and hydrocarbon profiles of pork cutlets. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 59, n. 11, p. 8372-8382, 9 nov. 2024.

Campo elétrico pulsado na conservação de alimentos: princípios e aplicações

Daniel Sgrancio Uliana • Bárbara Morandi Lepaus •

Jackline Freitas Brilhante de São José

A conservação de alimentos surgiu da necessidade do homem em manter os alimentos em condições de consumo por longos períodos. Diversas técnicas foram desenvolvidas no decorrer dos tempos com o intuito de interromper reações químicas e bioquímicas indesejáveis, bem como o crescimento de microrganismos, incluindo os patogênicos e deterioradores, evitando perdas de alimentos (ARAÚJO *et al.*, 2022; CAVALCANTI *et al.*, 2023). A deterioração dos alimentos é um dos maiores desafios presente na indústria alimentícia e pode ocorrer devido a presença de microrganismos e enzimas. Estas, constituem importantes fatores na deterioração, uma vez que permanecem ativas após a colheita e causam alterações na textura, cor e propriedades sensoriais (CAVALCANTI *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2025).

Diferentes métodos de conservação podem ser utilizados para aumentar a vida útil de um alimento, podendo ser divididos em métodos biológicos, químicos e físicos. A fermentação, por exemplo, é o

principal método biológico de conservação aplicado na indústria de vinhos, cervejas e iogurtes. Os métodos químicos estão relacionados ao controle do pH e acidez, adição de conservantes, antimicrobianos e antioxidantes. Já os métodos físicos são divididos em duas categorias: térmicos, nos quais há o emprego de temperaturas baixas ou altas e os não térmicos (CAVALCANTI *et al.*, 2023).

A pasteurização, desenvolvida por Louis Pasteur em 1863, é um dos métodos térmicos mais empregados, tem como objetivos principais a destruição de microrganismos patogênicos e microrganismos de baixa resistência ao calor, responsáveis pela alteração do produto e inativação de enzimas (RAMÍREZ-CORONA, 2024; SINGH; PANDEY; MANIK, 2024). A esterilização e secagem também são eficientes no controle microbiológico, permitindo o desenvolvimento de alimentos mais seguros e com prolongada vida útil (DELORME *et al.*, 2020; RAMÍREZ-CORONA, 2024).

Embora sejam amplamente aplicados, tratamentos térmicos podem afetar as características nutricionais e sensoriais do alimento, além de causar perda de compostos bioativos, vitaminas, oxidação lipídica e desnaturação proteica. Ao mesmo tempo, os consumidores estão cada vez mais buscando alimentos mais saudáveis, saborosos e que passaram por poucas etapas de processamento (ARAÚJO *et al.*, 2022; CAVALCANTI *et al.*, 2023; RAMÍREZ-CORONA, 2024).

Diante disso, a indústria de alimentos vem procurando alternativas que garantam a satisfação do consumidor. Essas alternativas incluem o uso de tecnologias emergentes e não-térmicas, as quais têm sido amplamente estudadas e aprimoradas nos últimos anos, com o intuito de gerar menos alterações nas características sensoriais e nutritivas dos alimentos (HASSOUN *et al.*, 2024; RAMÍREZ-CORONA, 2024). A adoção dessas tecnologias visa também a produção de alimentos ecologicamente sustentáveis, com uso reduzido de água e energia. Além disso, busca-se diminuir o desperdício de alimentos e aumentar a produtividade (ARAÚJO *et al.*, 2022; CAVALCANTI *et al.*, 2023).

Nesse contexto, desenvolveu-se a aplicação de Campos Elétricos Pulsados (CEP), que veio do termo em inglês *Pulsed Electric Fields* (PEF), que será abordado ao longo do texto como CEP. Os CEP de alta intensidade surgiram como método não térmico alternativo à pasteurização de alimentos. A tecnologia consiste na aplicação de pulsos elétricos de alta voltagem (tipicamente 10-80 kV/cm) por curtos períodos (μ s a ms), com o alimento posicionado entre dois eletrodos em câmara de tratamento (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Contudo, embora o princípio pareça simples, sua aplicação eficaz requer a caracterização precisa da matriz alimentar (composição, condutividade, viscosidade); a identificação dos microrganismos-alvo e seus mecanismos de resistência; além da compreensão dos parâmetros críticos de processo (intensidade de campo, duração do pulso, temperatura). Isso ocorre, pois a aplicação de tecnologias não-térmicas varia com o tipo de alimento a ser processado. Por exemplo, a alta pressão, campo elétrico pulsado, agentes antimicrobianos são benéficos ao aplicar em alimentos líquidos e sólidos, enquanto o CEP é mais adequado para alimentos líquidos (TSUKAMOTO, 2007). Ainda assim, alguns equipamentos estão sendo desenvolvidos para permitir a aplicação de CEP em diferentes tipos de alimentos (ZHANG *et al.*, 2023).

Entre os métodos não térmicos, o emprego de CEP é uma alternativa para substituição do tratamento térmico convencional como pasteurização, por exemplo. Esse método apresenta vantagens como maior preservação dos nutrientes e das características sensoriais do alimento, uso de baixas temperaturas, menor custo com energia e tempo de processamento (ARAÚJO *et al.*, 2022; DANGAL *et al.*, 2024). Sendo assim, este capítulo visa abordar os conceitos e aplicações da tecnologia de CEP, bem como apresentar os desafios relacionados ao uso desta tecnologia na conservação dos alimentos.

Desvendando os campos elétricos pulsados

O CEP é um método não térmico que envolve a aplicação de pulsos de alta voltagem em curtos intervalos de tempo (microsegundos) no alimento, posicionado entre dois eletrodos, visando à inativação microbiana sem causar efeitos negativos sobre os atributos de qualidade do produto. A câmara de tratamento consiste em dois eletrodos entre os quais o alimento é exposto, enquanto pulsos de alta intensidade (10 a 80 kV/cm) são aplicados (TAHA *et al.*, 2022). Um sistema típico de processamento de alimentos por CEP consiste principalmente em uma fonte de alimentação de pulsos de alta tensão, uma câmara de tratamento, um sistema de manuseio de fluidos e sistemas de controle e monitoramento. Dependendo do design da câmara, o processo de CEP pode ser operado em modo contínuo ou em lote (NIU *et al.*, 2020).

O projeto adequado da câmara de tratamento é crucial para maximizar a eficiência do tratamento por CEP, bem como a uniformidade do processo. A degradação dielétrica, que pode ocorrer se a intensidade do campo for muito alta, é uma consideração importante no desenvolvimento de compartimentos de processamento, visando evitar danos ao alimento e à estrutura do sistema (GHOSHAL, 2023; ZHANG *et al.*, 2023). Portanto, o design estrutural da câmara deve considerar cuidadosamente a distribuição do campo elétrico, a distorção da intensidade do campo, a distribuição do fluido e o campo de temperatura do alimento no interior da câmara.

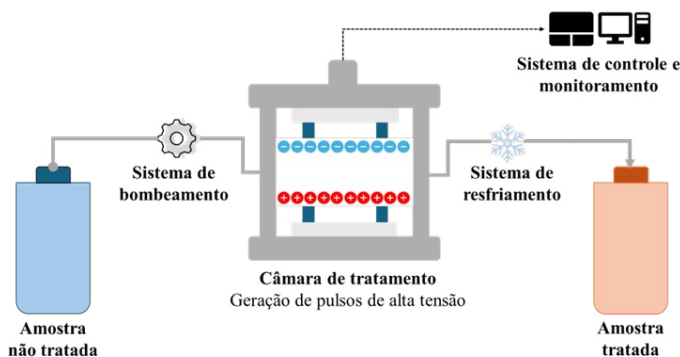
Os tipos mais comuns de câmara de tratamento são os modelos planar, coaxial e axial, e os materiais frequentemente utilizados incluem eletrodos de aço inoxidável anticorrosivo e invólucros de politetrafluoroetileno (PTFE) (ARSHAD *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2023). Para alimentos líquidos, semissólidos ou bombeáveis, como sucos, leite, purês, e polpas de frutas, o sistema mais utilizado é o processamento contínuo em câmara de tratamento, que permite um

fluxo constante do produto enquanto é submetido aos pulsos elétricos (Figura 1).

Já as câmaras de tratamento estática realizam tratamento em lote e são fechadas, contendo eletrodos de placas paralelas, o que oferece vantagens como *design* simples e distribuição uniforme do campo elétrico (Figura 2). No caso de alimentos sólidos, como tubérculos, estes são transportados por uma esteira que contém pelo menos dois eletrodos. Os produtos são imersos em água para aumentar a eficiência energética nessa aplicação (ZHANG *et al.*, 2023).

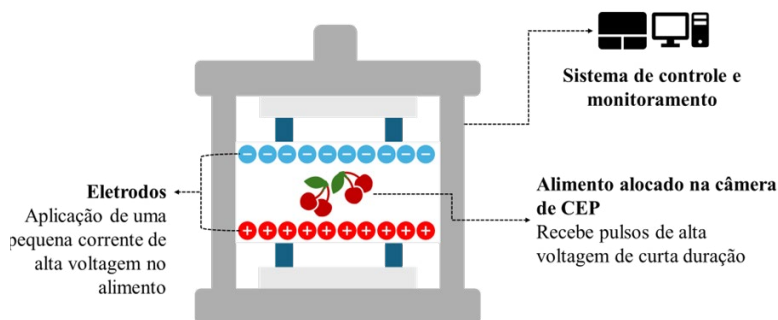
O sistema de processamento de CEP para tratamento de alimentos envolve vários componentes essenciais, incluindo um compartimento de processamento, um gerador de corrente contínua de alta energia, resistores de carga temporária, capacitores de armazenamento de energia e interruptores para controlar a descarga de energia. O processo começa com a energia sendo acumulada em um capacitor e é liberada rapidamente para a câmara de tratamento do alimento, gerando o campo elétrico necessário para o tratamento. Um osciloscópio é utilizado para monitorar a forma de onda da pulsação e garantir a precisão do processo. Além disso, bombas e sistemas de resfriamento auxiliam no transporte do alimento e na manutenção da temperatura adequada durante o processamento (ARAÚJO *et al.*, 2022; GHOSHAL, 2023).

Figura 1: Representação esquemática de um sistema de campos elétricos pulsados em formato contínuo para processamento de alimentos líquidos, semissólidos ou bombeáveis



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2. Configuração de um sistema estático (lote) de tratamento por campo elétrico pulsado para processamento de alimentos sólidos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação às formas de onda comumente utilizadas no processamento por CEP, as quadradas e de decaimento exponencial, tanto monopulares quanto bipolares, representam as configurações mais empregadas. Os pulsos de onda quadrada são considerados superiores aos de decaimento exponencial, pois mantêm uma intensidade

constante e sustentada ao longo de toda a duração do pulso. Em comparação com os pulsos monopolares, os pulsos bipolares demonstram maior eficácia na permeabilização da membrana celular. Esse efeito é atribuído à fadiga estrutural da membrana, resultante do estresse alternado causado pela reversão de polaridade em alta frequência (NIU *et al.*, 2020).

Atualmente, existem dois métodos principais para a geração de pulsos de alta tensão: o primeiro utiliza um sistema baseado em transformador, no qual pulsos de baixa tensão são amplificados por meio de um transformador de pulsos. O segundo método emprega um gerador de Marx, que permite uma alta eficiência na conversão de energia através do carregamento e descarregamento de capacitores dispostos em paralelo (ZHANG *et al.*, 2023).

A fonte de alimentação é crucial para fornecer alta potência contínua, convertendo energia de 110 V para altas tensões necessárias ao tratamento. A energia é armazenada nos capacitores e liberada em pulsos rápidos, que passam pelo alimento, alterando suas propriedades. O processo é altamente eficiente, pois utiliza os capacitores para fornecer alta energia em um curto intervalo de tempo (ARAÚJO *et al.*, 2022; GHOSHAL, 2023). Em sistemas de maior escala, o uso de compartimentos de processamento contínuo e resfriamento adicional se torna essencial para evitar o aquecimento excessivo e garantir a qualidade do produto (GHOSHAL, 2023).

Os capacitores de alta potência desempenham um papel vital, armazenando energia para gerar campos elétricos de alta intensidade. A eficácia do CEP depende de um sistema bem projetado de capacitores, que acumulam e liberam energia rapidamente, e interruptores, que controlam essa liberação. A tecnologia de capacitores e interruptores é crucial para o sucesso do CEP, pois permite que a energia seja liberada de forma controlada e eficiente, maximizando os efeitos desejados no alimento processado. A escolha de materiais e o design dos interruptores influenciam diretamente a qualidade e a duração do processo (ARAÚJO *et al.*, 2022; GHOSHAL, 2023).

Além disso, os interruptores, responsáveis pela descarga dos capacitores, são projetados para resistir a altas tensões e correntes. Existem diferentes tipos de interruptores, como ignitores e semicondutores, escolhidos com base em sua velocidade de operação e capacidade de suportar altas correntes. Esses interruptores desempenham um papel crucial na liberação precisa da energia armazenada, garantindo que os pulsos de alta tensão sejam aplicados de maneira eficaz no alimento (GHOSHAL, 2023).

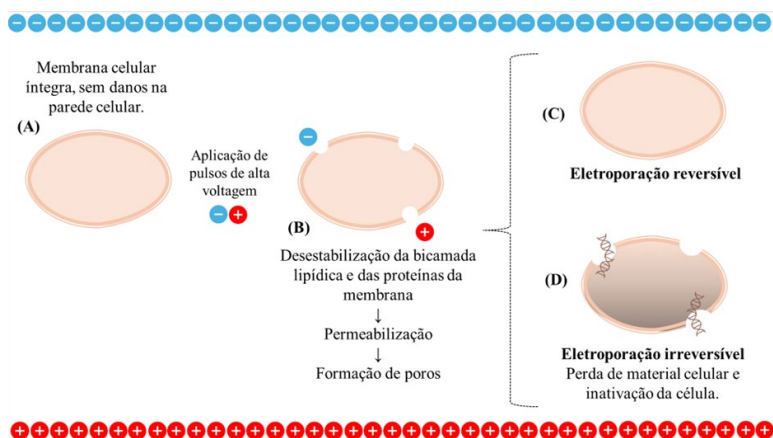
O nível do tratamento é determinado pelo tempo de permanência do produto na câmara, pela frequência ou número de pulsos, e pela duração e intensidade dos pulsos. Além disso, como o tratamento ocorre em temperatura ambiente ou abaixo dela, com duração de microssegundos, a perda de energia na forma de calor é minimizada (ARSHAD *et al.*, 2021).

Princípios da inativação microbiana por campo elétrico pulsado

O princípio da aplicação de CEP para a inativação de microrganismos não é recente. Há relatos da utilização dessa tecnologia em 1915, na cidade de Liverpool, para o tratamento de leite (BARBOSA-CANOVAS *et al.*, 1999). A utilização de alta tensão por pulsos para a destruição de microrganismos foi sugerida pela primeira vez em 1960. Desde então, começou a ser estudada e aprimorada. Posteriormente, foi desenvolvido o tratamento via CEP, que utiliza pulsos elétricos de pequena duração para minimizar o efeito Joule e, portanto, diminuir o aquecimento do produto (GUIONET *et al.*, 2021). Por esse motivo, os processos não-térmicos vêm ganhando importância tecnológica para conservação de alimentos, inativando os microrganismos e minimizando a degradação de nutrientes e propriedades sensoriais que ocorrem no tradicional tratamento térmico (CAVALCANTI *et al.*, 2023).

O tratamento com CEP consiste na aplicação de pulsos de alta voltagem e curta duração no alimento, causando a formação de microporos nas membranas celulares. Quando uma célula biológica é exposta a um CEP de alta intensidade, ocorre a permeabilização da membrana, fenômeno conhecido como eletroporação, representado pela Figura 3.

Figura 3: Mecanismo de eletroporação reversível e irreversível causada por campos elétricos pulsados



Fonte: Elaborado pelos autores.

O mecanismo de eletroporação da célula pelo CEP pode ser reversível ou irreversível. Para ambas as situações, inicialmente, a célula se encontra em seu estado natural antes da aplicação do tratamento, com o potencial de membrana (V_m) intacto e a membrana celular íntegra, sem poros ou danos (Figura 3A). Em seguida, ocorre a compressão da membrana devido ao aumento do potencial até V (maior que V_m), causando redistribuição de cargas elétricas e propiciando o início da formação de poros na membrana (Figura 3B). Na sequência, o aumento do potencial até um valor crítico (V_c), culmina na formação de poros reversíveis, situação na qual a célula pode

se recuperar se o campo elétrico for removido a tempo (Figura 3C). E, por fim, registra-se um aumento do tamanho dos poros, tornando-os irreversíveis (Figura 3D) devido à aplicação de um campo elétrico muito alto, o que leva à perda de material celular e à inativação da célula (ARSHAD *et al.*, 2020).

A aplicação de campos de baixa intensidade, que provocam aumento da permeabilidade celular reversível, são amplamente utilizados na engenharia genética para extração e síntese de compostos. Já o CEP de alta intensidade, induz a formação de poros irreversíveis, resultando na perda da função de barreira e vazamento de conteúdo intracelular, o que leva à perda de vitalidade (ARAÚJO *et al.*, 2022; SYAMSIANA *et al.*, 2025). No contexto de alimentos, seu principal efeito é a inativação microbiana por danificação parcial ou total da membrana celular. O processo pode ocorrer em duas etapas, sendo que a primeira é a perfuração inicial como uma resposta à superação do potencial limite da membrana, seguido de seu aumento com o tempo. A formação de poros é facilitada pela força do campo elétrico e baixa força iônica do meio, sendo relativamente independente da temperatura (RAMOS *et al.*, 2006).

A eletroporação, e o rompimento de células que levam a sua lise, foram descritos como uns dos principais causadores de alterações produzidas pelo CEP em bactérias e leveduras (CASTRO *et al.*, 1993). Contudo, diversos fatores podem influenciar a efetividade de inativação dos microrganismos através da utilização de CEP, como as técnicas de produção, potência do campo elétrico, o comprimento e formato dos pulsos, o número de pulsos e as temperaturas de processamento e tipos de células microbianas (GHOSHAL, 2023). A presença de uma camada de peptidoglicano na parede celular de bactérias gram-positivas, por exemplo, as torna mais resistentes a esse método em comparação com as bactérias gram-negativas. Além disso, os fungos são menos resistentes que as bactérias. De forma geral, microrganismos em fase exponencial são mais suscetíveis ao tratamento do que aqueles que estão na fase estacionária ou na fase lag. Como fator

limitante, o CEP não é efetivo na inativação de esporos de fungos e bactérias (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Muitas hipóteses têm sido propostas para elucidar se a formação inicial dos poros ocorre na parte proteica ou na lipídica da bicamada da membrana celular. Uma dessas hipóteses sugere que o processo se deve à formação imediata de canais condutivos e ao rápido desenvolvimento de uma região de alta condutância na porção lipídica da membrana. Isso ocorre porque o aumento no comprimento dos poros na parte lipídica acontece na escala de microssegundos, enquanto a desnaturação proteica (causada por efeito Joule ou modificação elétrica), proposta como alternativa, ocorre em uma escala de tempo maior, variando de milissegundos a segundos (ANGERSBACH *et al.*, 2000). Ainda não há trabalhos conclusivos na literatura sobre esse tema. No entanto, há consenso entre diversos autores de que o colapso da membrana é fundamental para a inativação microbiana, restando discutir qual seria a cinética exata desse processo.

Entende-se que os principais efeitos dessa tecnologia são produzidos na membrana da célula microbiana, embora o rompimento de organelas internas e outras mudanças estruturais também tenham sido comprovados, sugerindo que eletroporação não é o único mecanismo de inativação. Um dos componentes importantes de uma célula biológica é a sua membrana, porque age como uma barreira semipermeável em uma célula não submetida a estresse, também atua na extrusão extracelular de enzimas e materiais da parede celular, é o local de muitas atividades complexas, incluindo RNA, proteínas e síntese da parede celular, transporte de elétrons, e fosforilação oxidativa, e desempenha um papel importante no controle da síntese do DNA (BARBOSA-CANOVAS *et al.*, 1999). Sendo assim, qualquer dano à membrana afeta suas funções e pode causar inibição da reprodução celular.

Além disso, o CEP também pode inativar microrganismos patogênicos e enzimas endógenas, contribuindo para a segurança

microbiológica e estabilidade enzimática dos alimentos durante o armazenamento e descongelamento (RONDINELLI; SILVA, 2024).

Um trabalho não muito recente, descrito por Wesierska e Trziszka (2007), avaliaram a redução de estirpes de diversas bactérias incluindo *Escherichia coli*, *Acinetobacter lwoffii*, *Citrobacter freundii*, *Serratia liquefaciens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus gallinarum*, *Staphylococcus xylosus* e *SP Oligella*, isoladas a partir da superfície da casca do ovo, mediante a aplicação de CEP utilizando dois diferentes diluentes: solução fisiológica e clara de ovo. Foram preparadas suspensões contendo 10^6 UFC/ml, os quais foram tratadas com 1-300 impulsos elétricos entre 15, 20 e 25 kV, separados 1 s período de pulso. A redução significativa na população de bactérias foi anotada usando 200 pulsos e intensidade de 25 kV. Ao final do processo o número de células foi reduzido na população por mais de 3-5 ciclos log, dependendo de bactérias. Uma das principais conclusões da supracitada pesquisa foi que a morte dos microrganismos não foi associada com um aumento na temperatura, uma vez que a temperatura de amostra submetida a impulsos elétricos não foi superior a 47 °C, após o processamento.

Aplicação de campos elétricos pulsados em alimentos

O interesse por aplicação de CEP no processamento de alimentos é crescente principalmente por se tratar de um tratamento não térmico, sem uso de aditivos químicos e por não gerar alterações significativas nas características do alimento durante o processamento. O CEP promove inativação microbiana efetiva, bem como retardo em várias reações químicas e enzimáticas indutoras de deterioração e retenção de componentes funcionais. Além disso, por ser um tratamento não térmico, possibilita a preservação de compostos termolábeis e voláteis, bem como vitaminas e minerais dos alimentos

durante o processamento (ARAÚJO *et al.*, 2022; GHOSHAL, 2023; SYAMSIANA *et al.*, 2025).

A capacidade da tecnologia em prolongar a vida útil dos alimentos sem provocar alterações indesejáveis nas características sensoriais, incluindo cor, odor, sabor e textura tem atraído a atenção da indústria alimentícia para implementação dessa tecnologia (ALI *et al.*, 2024). Além de preservar a qualidade sensorial, o CEP é conhecido por sua capacidade de preservar a qualidade nutricional, aumentar a durabilidade e garantir a segurança dos alimentos (DANGAL *et al.*, 2024; RONDINELI; SILVA, 2024). Estudos têm apontado que o CEP também pode contribuir para melhoria da textura de alguns produtos alimentícios, como aumento da maciez de produtos cárneos, por exemplo, devido seu potencial de romper membranas celulares através da eletroporação (ALI *et al.*, 2024).

Essa tecnologia é versátil podendo ser aplicada em uma ampla variedade de alimentos. Contudo, a sua eficácia está intrinsecamente ligada às propriedades elétricas da matriz alimentar. Por exemplo, a aplicação de CEP em alimentos líquidos é mais eficiente, uma vez que materiais líquidos são geralmente considerados condutores elétricos porque eles contêm grandes concentrações de íons como portadores de carga elétrica (NALIYADHARA *et al.*, 2022). Para gerar um CEP de alta intensidade dentro de um alimento, um grande fluxo de corrente deve passar em período muito curto de tempo. Como o tempo entre pulsos é muito mais do que a largura de pulso, a geração de pulsos envolve lento carregamento e descarregamento rápido do capacitor (BARBOSA-CANOVAS *et al.*, 1999).

Além disso, os alimentos líquidos são menos propensos ao fenômeno de ruptura dielétrica, que consiste numa descarga elétrica entre os dois eletrodos da câmara, um fenômeno análogo a um relâmpago. Esta descarga de energia pode acarretar reações indesejáveis no alimento ou até mesmo a explosão da câmara de tratamento. Este fenômeno está relacionado com a condutividade elétrica do alimento, no qual alimentos sólidos por conterem ar em seu interior ou por não

serem homogêneos apresentam maior probabilidade de ocorrência da ruptura dielétrica (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Portanto, existe crescente interesse para avaliar a eficácia do CEP como alternativa aos tratamentos térmicos convencionais, como a pasteurização, testando diferentes tipos de alimentos, com o objetivo de esclarecer os desafios e benefícios desse tratamento na indústria alimentícia (LYTRAS *et al.*, 2024).

Thamsuaidee *et al.* (2024) avaliaram o uso de CEP como alternativa à pasteurização tradicional do leite à base de aveia e demonstraram um desempenho satisfatório de descontaminação. Os autores revelaram que os níveis de inativação de um micro-organismo deteriorador (*Lactiplantibacillus plantarum*), aumentaram conforme a intensidade do tratamento aumentou. De forma geral, para a maioria das condições de tratamento, foi possível atingir reduções de $\geq 5,7$ log. De forma similar, Li e Padilla-Zakour (2024), avaliaram a eficiência do CEP em comparação à pasteurização tradicional em suco de uva. O suco tratado com CEP manteve-se microbiologicamente seguro por 5 meses armazenados a 4 °C., além disso, o suco tratado com CEP combinado à alta pressão demonstrou ter maior rendimento, intensidade de cor, nutrientes e sabor fresco, além de vida útil estendida, maior aceitabilidade do consumidor e intenção de compra em comparação ao suco pasteurizado tradicionalmente por calor (LI; PADILLA-ZAKOUR, 2024).

Akdemir Evrendilek; Mustuloğlu; Turan, (2025) aplicaram CEP em pistaches e avaliaram seu impacto na desinfecção da superfície e preservação das propriedades físicas, químicas, bioativas e sensoriais. Os autores demonstraram que a aplicação de até 71,23 J/kg foi altamente eficaz na inativação de *Salmonella* spp., coliformes totais, mesófilos aeróbios, fungos filamentosos e leveduras. Além disso, demonstrou melhorar as propriedades físicas, a cor e manter os níveis de peróxido, teor de gordura total, bem como melhorou as propriedades sensoriais do pistache.

Por fim, Lin *et al.* (2024) demonstraram que a utilização de CEP retardou a deterioração da textura em caquis, durante o armazenamento pós-colheita. Além disso, aumentou a capacidade dos caquis de resistir a danos oxidativos. Chang *et al.* (2023) observaram que o CEP de 50 kV/m foi benéfico para a manutenção da integridade do tecido de atemoia (*Annona cherimola* e *Annona squamosa*), diminuindo a taxa de respiração celular e a degradação da parede celular. No entanto, o tratamento excessivo de 100 kV/m aumentou a atividade de enzimas responsáveis pelo amolecimento do tecido, dificultando a manutenção da textura.

Portanto, é importante destacar que a intensidade do campo e o tempo de exposição devem ser definidos levando em consideração o tipo de alimento a ser tratado, para que seja possível promover uma descontaminação efetiva e, ao mesmo tempo, evitar que o tratamento cause danos às características nutricionais e sensoriais do alimento.

Além de efeito antimicrobiano, o CEP também possui eficiência na inativação enzimática (GHOSHAL, 2023). Os primeiros trabalhos citados na literatura sobre o efeito da aplicação de CEP na inativação de enzimas datam do final dos anos 60. Após alguns anos sem novos trabalhos, a partir de meados dos anos 90, o interesse pelo efeito dos CEP sobre atividade enzimática se intensificou novamente. A ação do tratamento com CEP nas enzimas pode variar de enzima, sendo que em alguns casos promove a inativação e em outros é verificada a resistência da enzima (ZHAO *et al.*, 2012; NIU *et al.*, 2020).

Além disso, ainda não há um consenso sobre qual é o mecanismo de atuação dos CEP nas enzimas (RUHLMAN *et al.*, 2002; NIU *et al.*, 2020). Para alguns autores a inativação pode ocorrer devido à oxidação de alguns componentes da enzima como grupos sulfidrilas. Para outros autores a inativação enzimática ocorre devido a mudanças na estrutura terciária ou secundária da proteína (AKDEMIR EVRENDILEK; HITIT ÖZKAN, 2024; BASAK; CHAKRABORTY, 2022). Além disso, há uma dificuldade em comparar a sensibilidade das enzimas em relação ao processamento por CEP, pois diferentes tipos de

equipamentos e de condições operacionais são utilizados nas pesquisas (ZHAO *et al.*, 2012; NIU *et al.*, 2020).

O CEP também se demonstrou eficaz na inativação da atividade da fosfatase alcalina no leite. A atividade dessa enzima é utilizada na indústria de processamento de leites como parâmetro para verificar a eficiência da pasteurização (GHOSHAL, 2023). Outras enzimas também foram estudadas, como plasmina, proteases, polifenoloxidase e peroxidase que tiveram sua atividade reduzida com a aplicação de CEP (ARAÚJO *et al.*, 2022; GHOSHAL, 2023).

As mudanças na estrutura e conformação das enzimas podem ser responsáveis pelas modificações na atividade enzimática devido aos tratamentos com CEP (NIU *et al.*, 2020). A inativação enzimática induzida por CEP está associada as alterações nas estruturas secundárias (α -hélice e folha- β), terciária e quaternária das enzimas. Essas modificações incluem mudanças na conformação espacial da estrutura terciária e na organização das subunidades das proteínas na estrutura quaternária. A conformação estrutural de uma proteína é crucial para sua atividade biológica, sendo as ligações de hidrogênio os principais responsáveis por manter essa forma. O CEP, ao romper essas ligações de hidrogênio, induz mudanças conformacionais nas proteínas, resultando em efeitos significativos na atividade enzimática. Dessa forma, o CEP promove o desdobramento da estrutura da enzima, levando a modificações conformacionais e, conseqüentemente, à inativação enzimática (AKDEMIR EVRENDILEK; HITIT ÖZKAN, 2024; UMAIR *et al.*, 2022).

Também é importante ressaltar que o CEP pode induzir eletrólise e formação de radicais livres, levando a mudanças de pH durante o tratamento. Sabe-se também que a atividade de enzimas, como a polifenoloxidase e fosfatase alcalina, são extremamente afetadas em decorrência da queda do pH (AKDEMIR EVRENDILEK; HITIT ÖZKAN, 2024; BASAK; CHAKRABORTY, 2022). Ademais, a intensidade do campo, número de pulsos e forma do pulso são os principais parâmetros que influenciam na inativação enzimática. Além disso,

a enzima a ser inativada também influencia na eficiência do tratamento, visto que algumas enzimas, como a lipoxigenase, se mostram resistentes ao tratamento por CEP. Por fim, a concentração inicial, o tipo de alimento e as condições de processamento também interferem na capacidade de inativação enzimática (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Fatores que afetam a eficiência da aplicação do CEP

De forma geral, a energia necessária para atingir um determinado nível de inativação de agentes microbiológicos ou enzimáticos depende do volume da câmara de tratamento, da taxa de fluxo do produto, número de pulsos ou tempo, e configuração do sistema. Por mais de duas décadas, tratamentos utilizando CEP são utilizados para indução de poros ou estruturas semelhantes a poros durante processos de troca de materiais através da membrana. A tecnologia de CEP tem potencial tanto para a economia e eficiência do uso de energia, bem como para proporcionar aos consumidores alimentos microbiologicamente seguros, minimamente processados, nutritivos e frescos (UMAIR *et al.*, 2022).

Contudo, a eficiência do CEP depende de diversos fatores, como as características elétricas dos alimentos, intensidade do campo elétrico aplicado, duração do tratamento, temperatura do tratamento, tipo e forma do microrganismo ou enzima e pH do meio. O nível de inativação microbiana por CEP está relacionado a diversos fatores, entre eles números e duração de pulsos e a intensidade da corrente elétrica (ARAÚJO *et al.*, 2022; CALLEJA-GÓMEZ *et al.*, 2024; GHOSHAL, 2023).

Além disso, como descrito anteriormente, o CEP é mais eficiente em alimentos líquidos, devido a sua capacidade de condutividade elétrica. Alimentos com baixa condutividade elétrica, baixa viscosidade e alta densidade são mais facilmente processados, pois permitem um controle preciso da temperatura dentro das câmaras de tratamento,

evitando variações que poderiam comprometer a uniformidade do campo elétrico aplicado (ARAÚJO *et al.*, 2022). Contudo, a aplicação dos CEP em alimentos sólidos vem ganhando relevância, especialmente como pré-tratamento para extração de compostos bioativos. Essa abordagem é viabilizada pelo fenômeno da eletroporação, que facilita a ruptura celular e a liberação de substâncias de interesse, como polifenóis, pigmentos e óleos essenciais, aumentando o rendimento de extração e reduzindo a necessidade de solventes químicos ou altas temperaturas (ZHANG *et al.*, 2023).

Os principais parâmetros que influenciam na eficiência do CEP são o meio de aplicação, o pH, a condutividade elétrica e o tipo de microrganismo ou enzima a ser inativado. Em relação ao meio de aplicação, a presença de íons, agentes protetores ou inibidores de microrganismos podem proteger ou aumentar a eficiência de inativação de microrganismos, por exemplo. O pH, por sua vez, é um parâmetro crítico para o crescimento de microrganismos e atividade de enzimas, o que influencia na efetividade de quase todos os meios de conservação. A condutividade elétrica está relacionada à capacidade de ocorrer a ruptura dielétrica, de forma que quanto maior for a condutividade elétrica do alimento, maior a probabilidade. Assim, campos menores podem ser utilizados em alimentos com maior condutividade elétrica. Por fim, o tipo de agente a ser inativado é importante, pois enzimas e microrganismos podem apresentar resistência específica ao tratamento. Além disso, a concentração inicial também precisa ser levada em consideração e pode afetar a efetividade do CEP (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Considerações finais

A tecnologia de Campos Elétricos Pulsados (CEP) apresenta-se como uma alternativa aos métodos térmicos tradicionais aplicados na conservação de alimentos, combinando eficácia microbicida com notável

preservação das características sensoriais e nutricionais. Ao permitir a inativação de microrganismos patogênicos e deterioradores sem elevação significativa de temperatura, os CEP mantêm atributos de qualidade importantes nos alimentos tratados, como cor, textura, aroma e sabor mais próximos aos do alimento *in natura*, atendendo às crescentes demandas dos consumidores por produtos minimamente processados. No entanto, a tecnologia encontra algumas limitações importantes em sua aplicação prática, pois sua eficácia é mais observada em alimentos líquidos e semissólidos, devido à dependência da condutividade elétrica do meio para geração de campos homogêneos. Por outro, demonstra eficácia reduzida contra formas microbianas mais resistentes, particularmente esporos bacterianos, e certas enzimas termoestáveis, o que representa um desafio tecnológico significativo. Diante dessas limitações, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que busquem não apenas a otimização dos parâmetros operacionais como intensidade de campo, duração do pulso e temperatura para diferentes matrizes alimentares, mas também a investigação de abordagens combinadas com outras tecnologias emergentes de processamento. Adicionalmente, estudos mais aprofundados sobre os mecanismos de resistência de esporos e enzimas aos pulsos elétricos são essenciais para superar as atuais barreiras e ampliar o espectro de aplicação desta promissora tecnologia no setor alimentício.

Referências

AKDEMIR EVRENDILEK, G.; HITIT ÖZKAN, B. Pulsed electric field processing of fruit juices with inactivation of enzymes with new inactivation kinetic model and determination of changes in quality parameters. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 94, p. 103678, jun. 2024.

- AKDEMIR EVRENDILEK, G.; MUSTULOĞLU, Ş.; TURAN, S. Impact of pulsed electric fields technology on surface disinfection and quality properties of pistachios. **Food Control**, [s. l], v. 171, p. 111088, maio 2025.
- ALI, M. *et al.* Impact of sustainable emerging pulsed electric field processing on textural properties of food products and their mechanisms: an updated review. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l], v. 15, p. 101076, mar. 2024.
- ANGERSBACH, A.; HEINZ, V.; KNORR, D. Effect of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l], v. 1, n. 1, p. 135-149, 2000.
- ARAÚJO, C. S. *et al.* Aplicação de campos elétricos pulsados de alta intensidade na conservação de alimentos. In: SILVA, C. O.; TEIXEIRA, L. J. Q.; FILHO, T. L. (org.). **Tecnologia de alimentos: processamento não térmico**. 1. ed. Rio de Janeiro: Rubio, 2022.
- ARSHAD, R. N. *et al.* Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: an engineering perspective. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l], v. 104, p. 1-13, out. 2020.
- ARSHAD, R. N. *et al.* Pulsed electric field: a potential alternative towards sustainable food processing. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l], v. 111, p. 43-54, maio 2021.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. *et al.* **Preservation of foods with pulsed electric fields**. [S. l]: [s. n.], 1999.
- BASAK, S.; CHAKRABORTY, S. The potential of non-thermal techniques to achieve enzyme inactivation in fruit products. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l], v. 123, p. 114-129, maio 2022.
- CALLEJA-GÓMEZ, M. *et al.* Sustainable processing of food side streams and underutilized leftovers into high-added-value chemicals assisted by pulsed electric fields- and high-pressure processing-based technologies. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [s. l], v. 171, p. 117506, fev. 2024.

- CASTRO, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; SWANSON, B. G. Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l], v. 17, p. 47-73, 1993.
- CAVALCANTI, R. N. *et al.* Aspectos gerais. In: CRISTIANINI, M. *et al.* **Tecnologias emergentes no processamento de alimentos**. São Paulo: Blücher, 2023. cap. 1.
- CHANG, C.-K. *et al.* Prolonging the shelf-life of atemoya (*Annona cherimola* × *Annona squamosa*) using pulsed electric field treatments. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l], v. 88, p. 103458, ago. 2023.
- DANGAL, A. *et al.* Advances in non-thermal food processing methods-principle advantages and limitations for the establishment of minimal food quality as well as safety issues: a review. **Current Nutrition & Food Science**, [s. l], v. 20, n. 7, p. 836-849, set. 2024.
- DELORME, M. M. *et al.* Ultraviolet radiation: an interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l], v. 102, p. 146-154, ago. 2020.
- GHOSHAL, G. Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: gaps in current studies for potential future research. **Heliyon**, [s. l], v. 9, n. 6, p. e17532, jun. 2023.
- GUI, X.; SHANG, B.; YU, Y. Applications of electrostatic spray technology in food preservation. **LWT**, [s. l], v. 190, p. 115568, dez. 2023.
- GUIONET, A. *et al.* Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate α -amylase. **Journal of Electrostatics**, [s. l], v. 112, p. 103597, jul. 2021.
- HASSOUN, A. *et al.* Food traceability 4.0 as part of the fourth industrial revolution: key enabling technologies. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l], v. 64, n. 3, p. 873-889, jan. 2024.

- LI, Y.; PADILLA-ZAKOUR, O. I. Evaluation of pulsed electric field and high-pressure processing on the overall quality of refrigerated Concord grape juice. **LWT**, [s. l.], v. 198, p. 116002, abr. 2024.
- LIN, S.-H. *et al.* Pulse electric field pretreatment delays the texture deterioration of sweet persimmon (*Diospyros kaki* L.) during postharvest storage. **LWT**, [s. l.], v. 191, p. 115711, jan. 2024.
- LIU, L. *et al.* Critical review on food packaging strategy against spoilage. **Food and Humanity**, [s. l.], v. 4, p. 100481, maio 2025.
- LYTRAS, F. *et al.* Exploring the efficacy of pulsed electric fields (PEF) in microbial inactivation during food processing: a deep dive into the microbial cellular and molecular mechanisms. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 95, p. 103732, jul. 2024.
- NALIYADHARA, N. *et al.* Pulsed electric field (PEF): avant-garde extraction escalation technology in food industry. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 122, p. 238-255, abr. 2022.
- NIU, D. *et al.* Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. **Food Research International**, [s. l.], v. 137, p. 109715, nov. 2020.
- RAMÍREZ-CORONA, N. Implementing process intensification principles for food processing by emerging technologies. **Chemical Engineering and Processing – Process Intensification**, [s. l.], v. 205, p. 109981, nov. 2024.
- RAMOS, A. M. *et al.* Aplicação de campos elétricos pulsados de alta intensidade na conservação de alimentos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 53, n. 308, p. 425-438, 2006.
- RONDINELI, A.; SILVA, E. K. Pulsed electric field as a pre-treatment in food freezing processes: fundamentals, mechanisms, applications and impacts on frozen food quality. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 60, p. 104275, ago. 2024.
- RUHLMAN, K. T.; JIN, Z. T.; ZHANG, Q. H. Physical properties of liquid foods for pulsed electric field treatment. *In*:

- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; ZHAN, Q. H. (eds.). **Pulsed electric fields in food processing**: fundamental aspects and applications. USA: Technomic Publishing Company inc., 2002. p. 61-73.
- SINGH, P.; PANDEY, S.; MANIK, S. A comprehensive review of the dairy pasteurization process using machine learning models. **Food Control**, [s. l.], v. 164, p. 110574, out. 2024.
- SYAMSIANA, I. N. *et al.* Empowering small-scale industries food safety: designing fuzzy controlled pulse electric field pasteurization. **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 6, p. 100875, mar. 2025.
- TAHA, A. *et al.* Pulsed electric field: fundamentals and effects on the structural and techno-functional properties of dairy and plant proteins. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 1556, jan. 2022.
- THAMSUAIDEE, A. *et al.* Disentangling the effects of electroporation and heat during pulsed electric field (PEF) processing of oat-based milk alternative: a case study on *Lactiplantibacillus plantarum* inactivation. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 94, p. 103691, jun. 2024.
- TSUKAMOTO, J. Efeito esterilizante da aplicação de pulsos elétricos de alta voltagem em suco de laranja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 45-52, 2007.
- UMAIR, M. *et al.* Thermal treatment alternatives for enzymes inactivation in fruit juices: recent breakthroughs and advancements. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 86, p. 105999, maio 2022.
- ZHANG, C. *et al.* Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: a review. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 403, p. 134367, mar. 2023.
- ZHAO, W.; YANG, R.; ZHANG, H. Q. Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 83-96, out. 2012.

Aplicação de radiação ultravioleta no processamento de alimentos

Daniel Sgrancio Uliana • Bárbara Morandi Lepaus •

Alyne Gomes da Vitória Macedo •

Maria Clara de Moraes Motta Machado •

Jackline Freitas Brilhante de São José

Tratamentos térmicos, como a pasteurização e a esterilização, são comumente utilizados na produção de alimentos para prolongar a vida de prateleira e garantir a segurança do ponto de vista microbiológico. Entretanto, embora eficientes, a exposição ao calor pode afetar de forma negativa as características sensoriais dos alimentos tratados, causando prejuízos na cor, textura e sabor. Além disso, pode resultar em perda de compostos bioativos, vitaminas, oxidação lipídica e desnaturação proteica (DELORME *et al.*, 2020; RAMÍREZ-CORONA, 2024).

Os consumidores têm se mostrado cada vez mais conscientes e preocupados com a qualidade dos alimentos consumidos, relacionado à perspectiva de que estes sejam seguros, sustentáveis e adequados quanto aos seus aspectos nutricionais, sensoriais e sanitários (GUI;

SHANG; Yu, 2023; RAMÍREZ-CORONA, 2024). Diante disso, as indústrias alimentícias estão revolucionando a forma como processam os alimentos, com o objetivo de implementar tecnologias emergentes no processamento, visando atender às crescentes demandas do mercado. As tecnologias emergentes referem-se a inovações tecnológicas que não são usualmente utilizadas ou estão em desenvolvimento para aplicação, mas que têm o potencial de impactar significativamente diversos setores e trazer benefícios para a sociedade, economia e meio ambiente (HASSOUN *et al.*, 2024).

Neste contexto, as tecnologias emergentes no processamento de alimentos são capazes de produzir produtos de qualidade, com menor uso de aditivos sintéticos, bem como o consumo de água e energia, além de garantir a segurança dos alimentos (RAMÍREZ-CORONA, 2024). Os métodos não-térmicos constituem alternativas para obtenção de alimentos microbiologicamente seguros e com menores perdas na qualidade nutricional e sensorial, além de minimizar o consumo de energia e água (LIN *et al.*, 2024; MAHMOUD *et al.*, 2022).

A radiação ultravioleta (UV) é uma das tecnologias emergentes que vem ganhando interesse considerável da indústria de alimentos (DELORME *et al.*, 2020). Ela tem sido explorada como alternativa à pasteurização tradicional, por ser um sistema que permite obter alimentos com vida útil estendida, requer baixa demanda de energia, não produz resíduos tóxicos e promove inativação de microrganismos de forma eficiente (RAMÍREZ-CORONA, 2024). Dessa forma, a aplicação de radiação UV representa uma tecnologia inovadora para a conservação de alimentos sem provocar efeitos indesejáveis dos tratamentos térmicos convencionais, permitindo reduzir o tempo e o custo do processamento (DELORME *et al.*, 2020).

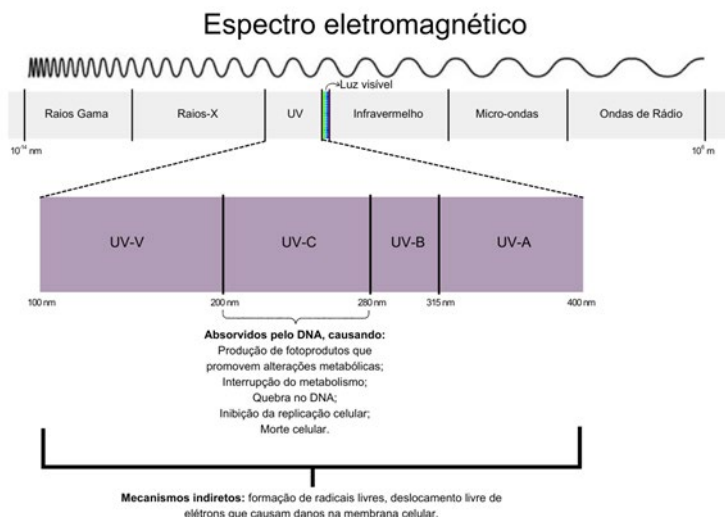
O presente capítulo abordará brevemente a história e os conceitos da tecnologia, os tipos de equipamentos utilizados, suas aplicações em alimentos e os fatores que influenciam sua eficácia.

Histórico e conceito da tecnologia

A radiação UV foi descoberta no ano de 1801, quando o cientista alemão Johann Wilhelm Ritter, por meio de experimento com cloreto de prata, observou uma forma invisível de luz além do violeta, conhecida posteriormente como luz ultravioleta no fim do século XIX (BALL, 2007; WANG *et al.*, 2023). Ela caracteriza-se como uma forma não ionizante de luz invisível, situada entre a luz visível e os raios-X no espectro eletromagnético. O sol é a principal fonte natural de radiação UV (DELORME *et al.*, 2020). Cerca de 66% da energia solar corresponde a radiação infravermelha e 32% correspondem a luz visível, enquanto apenas 2% correspondem a radiação UV que atinge a terra (SAHA *et al.*, 2024).

A classificação da radiação UV se dá por meio de suas características e compreende um comprimento de onda entre 100 e 400 nanômetros (nm). Ela produz quatro tipos principais de raios: os comprimento de onda longo (UV-A: 315–400 nm), médio (UV-B: 280–315 nm), curto (UV-C: 200–280 nm) e UV de vácuo (UV-V: 100–200 nm) (Figura 1) (DELORME *et al.*, 2020). Vale destacar que essa classificação pode variar de acordo com a literatura consultada.

Figura 1: Localização da luz ultravioleta no espectro eletromagnético e seu efeito sobre os microrganismos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os tipos UV-A e UV-B são os que atingem a Terra e normalmente são responsáveis por alterações na pele humana, podendo ocasionar queimaduras e até mesmo câncer (SAHA *et al.*, 2024). Os raios UV-C são descritos como germicidas, devido ao efeito letal que pode causar em diversos microrganismos, entretanto são totalmente absorvidos pela camada de ozônio, antes de atingir a crosta terrestre (DELORME *et al.*, 2020; SAHA *et al.*, 2024).

O efeito germicida da radiação UV, proveniente dos raios UV-C, foi reportado pela primeira vez em 1878, quando dois cientistas publicaram um artigo descrevendo a eliminação de bactérias expostas à luz de ondas curtas (DOWNING; BLUNT, 1878). Posteriormente, em 1930, nos Estados Unidos, iniciou-se a aplicação da tecnologia de luz UV para descontaminação do ar em ambientes hospitalares (BINTSIS; LITOPOULOU-TZANETAKI; ROBINSON, 2000; WANG *et al.*, 2023). Com o passar do tempo, essa técnica passou a

ser estudada também como alternativa para a descontaminação de alimentos, devido ao seu comprovado efeito germicida.

O uso de radiação UV é um tratamento a seco e não-térmico, de baixo custo e eficaz, tendo mostrado grande potencial para substituição da pasteurização na indústria de alimentos. Além disso, é um método que para sua aplicação demanda de pouco custo de investimento e manutenção, quando comparada aos métodos convencionais de conservação de alimentos (DELORME *et al.*, 2020). Além disso, esta tecnologia é capaz de preservar as características nutricionais e sensoriais do alimento, bem como assegurar a qualidade microbiológica (CRUZ *et al.*, 2022; DELORME *et al.*, 2020; RAMÍREZ-CORONA, 2024).

Aplicação de radiação UV em alimentos

Embora seja uma tecnologia não muito recente, a aprovação da utilização da tecnologia UV como tratamento alternativo para pasteurização térmica de sucos ocorreu apenas em 2000, pela *Food and Drug Administration* (FDA, 2000). O comprimento de onda UV utilizado no processamento de alimentos varia entre 200 a 280 nm (UV-C), que é o comprimento capaz de romper o ácido desoxirribonucleico (DNA) dos microrganismos, alterar seu metabolismo e causar a morte celular (DELORME *et al.*, 2020).

Para ser aplicada em alimentos é necessário utilizar fontes artificiais de radiação UV. Por isso a UV artificial inclui lâmpadas de arco, fluorescentes, UV-LEDs, lasers UV e lâmpadas específicas (como TL-01, black-light e UV-C de banda estreita) (TANG *et al.*, 2024). Para apresentar efeito germicida tais lâmpadas devem ser projetadas para emitir radiação UV-C, devido à capacidade dessa faixa inativar os microrganismos. Entretanto, a escolha da fonte UV correta, do comprimento de onda adequado e da dose são importantes para efetivar a eficiência do tratamento, e, permitir a ação da radiação na

inativação dos microrganismos presentes no alimento (DELORME *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2023).

A faixa de onda de 250-260 nm é letal para bactérias, fungos filamentosos, leveduras, vírus, protozoários e algas (CORRÊA *et al.*, 2020). A literatura demonstra que o comprimento de onda é mais eficaz a 254 nm e que a exposição de no mínimo 400 J/m² da luz UV nesse comprimento de onda assegura a redução adequada de 5 ciclos log de um microrganismo, importante para obter um alimento microbiologicamente seguro (CRUZ *et al.*, 2022; RAMÍREZ-CORONA, 2024).

De maneira geral, as propriedades germicidas da radiação UV ocorrem, sobretudo, em decorrência da absorção de luz UV por moléculas de DNA, no qual processos de transcrição e replicação são bloqueados e, assim, são comprometidas as funções celulares, ocasionando mutações que afetam o crescimento microbiano e podem levar à morte celular. Sendo assim, os efeitos da radiação UV sobre os microrganismos são proporcionais à quantidade de exposição à luz UV-C (DELORME *et al.*, 2020; RAMÍREZ-CORONA, 2024).

Outra importante questão é que os equipamentos e dispositivos para aplicação da radiação devem possuir lâmpadas e tamanho apropriados para atingir o efeito desejado. Assim, os efeitos germicidas dependem do fluxo de intensidade UV, como a função da intensidade e do tempo de exposição, determinada pela Equação (1) e podem variar dependendo do microrganismo e da distância do produto da fonte UV (CRUZ *et al.*, 2022; DELORME *et al.*, 2020).

$$D = I \times t \quad (1)$$

D = dose de UV conhecida, quantidade aplicada a uma superfície.

I = intensidade UV medida na superfície.

t = tempo de exposição.

A intensidade UV (W/m²) refere-se à radiação total em uma área específica. Em geral, a taxa de inibição das células aumenta com o tempo de exposição, a intensidade da luz UV e a proximidade da

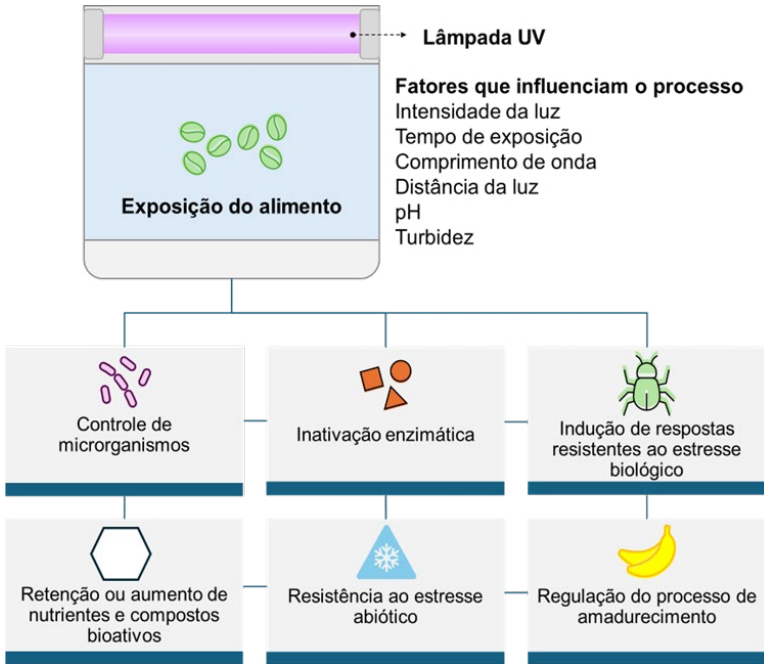
fonte de luz. A localização das amostras também influencia essa taxa, sendo mais eficaz quando as amostras estão diretamente sob as lâmpadas germicidas (DELORME *et al.*, 2020).

Contudo, a eficiência do processamento de alimentos com radiação UV é influenciada por diversos parâmetros, que podem ser categorizados em quatro aspectos principais: (1) características do alimento (composição química, viscosidade, densidade, turbidez, opacidade, cor e rugosidade); (2) parâmetros operacionais (número, posição e distância das lâmpadas em relação ao produto); (3) propriedades do equipamento (configuração do gabinete UV, tipo de lâmpada e espectro de emissão); e (4) características dos microrganismos-alvo (espécie, contagem inicial, fase de crescimento, condições de recuperação e resistência intrínseca) (DELORME *et al.*, 2020). Essa multiplicidade de fatores exige otimização individualizada para cada alimento e cenário de contaminação, a fim de garantir a eficácia do tratamento.

É importante ressaltar que a radiação UV tem baixa capacidade de penetração, o que representa um fator crítico a ser levado em consideração para garantir a utilização eficiente desse método. Em líquidos, a presença de compostos absorvedores de UV, compostos insolúveis, profundidade do líquido e intensidade UV podem afetar a eficiência do método (HUANG; CHEN, 2020). Bebidas como sucos, por exemplo, possuem coeficiente de absorção maior que a água, dificultam a luz UV de penetrar nesse líquido e atingir as células microbianas (MOGHADDAM; ASADI; KHALILI, 2024).

A luz UV também pode ser aplicada em alimentos sólidos como frutas, vegetais, raízes e carnes (CRUZ *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023). O principal objetivo da aplicação dessa técnica é reduzir a carga microbiana da superfície e aumentar a vida de prateleira. Entretanto, ela é capaz de trazer outros benefícios aos alimentos aplicados, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Esquema representando possíveis efeitos da radiação UV nos alimentos e fatores que podem influenciar o processo



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por exemplo, a radiação UV-C, também, estimula a produção de fenilalanina amônia-liase na superfície dos vegetais, que induz a formação de compostos fenólicos, como as fitoalexinas que podem aumentar ou induzir a resistência ao ataque microbiano (CRUZ *et al.*, 2022). Contudo, como a luz UV apresenta baixa capacidade de penetração, os alimentos devem ser expostos em camadas finas ou sob agitação (HINDS *et al.*, 2019; HUANG; CHEN, 2020).

É importante salientar que o FDA aprova o uso de radiação UV para controlar microrganismos em produtos alimentícios, apesar de não mencionar nenhuma dose mínima ou máxima a ser aplicada durante o processamento de alimentos (SINGH *et al.*, 2021). No

Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), por meio da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 21, de 26 de janeiro de 2001, aprovou o Regulamento Técnico para Irradiação de Alimentos. A resolução permite a aplicação desde que sejam implementadas as Boas Práticas de Irradiação e que se respeitem os limites máximos e mínimos das doses de aplicação, para alcançar a finalidade pretendida e evitar comprometimento das propriedades funcionais e/ou sensoriais do alimento (BRASIL, 2001).

A radiação UV-C apresenta-se como uma alternativa segura, inovadora e sustentável para o controle microbiano em alimentos líquidos e sólidos, oferecendo vantagens significativas em comparação com métodos convencionais: preservação das características nutricionais e sensoriais dos alimentos, ausência de resíduos químicos e redução no desperdício. No entanto, sua eficácia depende da seleção adequada de equipamentos, que devem assegurar tanto a descontaminação microbiana eficiente quanto a manutenção da qualidade do produto final.

Equipamentos utilizados

Os sistemas de aplicação de luz UV em alimentos são altamente compactos, requerem baixa demanda de energia e têm longa vida útil, além de não produzirem resíduos perigosos (RAMÍREZ-CORONA, 2024). Assim, diferentes equipamentos são utilizados para aplicação em alimentos sólidos ou líquidos. Geralmente são utilizados reatores para aplicar radiação UV em líquidos e câmaras UV para alimentos sólidos, dotados de lâmpadas que irradiam UV (DELORME *et al.*, 2020; KOCA; URGU; SAATLI, 2018).

Os reatores são amplamente utilizados para o tratamento de água, entretanto sua aplicação é limitada em sucos e outras bebidas por possuírem sedimentos ou alta turbidez, representando um coeficiente de absorção maior que o da água pura, dificultando sua ação

contra os microrganismos. Assim, a configuração dos reatores pode ser modificada, a fim de tornar o fluxo turbulento ou diminuir a profundidade do líquido em tratamento (KOCA; URGU; SAATLI, 2018; MOGHADDAM; ASADI; KHALILI, 2024).

A configuração física de um reator geralmente consiste em um dispositivo equipado com lâmpadas UV em seu interior. Essas lâmpadas são protegidas por um tubo de quartzo, evitando o contato direto com a bebida, enquanto emitem radiação que atravessa o líquido, inativando os microrganismos (KOCA; URGU; SAATLI, 2018).

De forma similar, as câmaras UV possuem uma configuração simples. Geralmente, consistem em um gabinete contendo lâmpadas UV na parte superior e uma bandeja, onde são colocados os alimentos com a superfície voltada para as lâmpadas, além de um radiômetro para medir a intensidade da radiação aplicada (ALENCAR *et al.*, 2024; DELORME *et al.*, 2020). Entretanto, todas as superfícies do alimento devem ser expostas à luz UV. Os produtos planos podem ser virados para exposição em ambos os lados. Além disso, lâmpadas adicionais podem ser inseridas nas laterais da câmara. Dessa forma, o número e a posição das lâmpadas é um fator crítico para desinfecção de toda a superfície do alimento. Além disso, é possível implementar um fluxo contínuo no sistema de desinfecção ao dispor os alimentos em um túnel equipado com lâmpadas UV, onde são transportados até a outra extremidade. O tempo de exposição e a velocidade deverão ser ajustados para garantia da eficácia do processo (KOCA; URGU; SAATLI, 2018).

As lâmpadas de vapor de mercúrio, xenônio pulsadas e diodos emissores de luz (LEDs) são fontes de luz UV com características distintas. As lâmpadas de mercúrio de baixa pressão emitem luz UV a 254 nm, enquanto as de média pressão emitem um espectro maior. Elas geram luz UV por ionização do vapor de mercúrio e gases inertes, entretanto possuem vida útil curta e o mercúrio é tóxico, exigindo pré-aquecimento prévio. As lâmpadas de xenônio pulsadas, que não contêm mercúrio, geram luz UV em um espectro de 200 nm

a 1100 nm, com a luz UV-C (200-280 nm) sendo crucial para a descontaminação de alimentos. No entanto, elas possuem uma vida útil mais curta, alta temperatura operacional e custo elevado. Com o surgimento da tecnologia LED, os pesquisadores começaram a explorar LEDs UV, que são livres de mercúrio, têm alta eficiência energética, não exigem pré-aquecimento e possuem uma vida útil longa. Apesar disso, ainda existem desafios no desenvolvimento de LEDs UV, como a suscetibilidade a danos estruturais. Ambos, LEDs UV e lâmpadas de xenônio pulsadas, oferecem vantagens em eficiência e respeito ao meio ambiente (WANG *et al.*, 2023).

Os LEDs são promissores para aplicação de radiação UV em alimentos, pois podem ser utilizados em diferentes comprimentos de onda e não trazem risco de contaminação química, como as lâmpadas de mercúrio. Dessa forma, vem sendo aplicado em diversos alimentos, como frutas, hortaliças, laticínios e produtos cárneos (HINDS *et al.*, 2019; TADESSE *et al.*, 2024). Marques *et al.* (2024) demonstraram que o uso de LEDs UV-C que emitem luz a 265 nm acarretaram uma redução de até 3,4 log de bactérias patogênicas (*Salmonella enterica* Typhimurium, *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli*) em salada mista de rúcula e alface. Também indicou que os LEDs foram eficazes na desinfecção de superfícies de aço inoxidável contaminados com *Listeria monocytogenes* e inativação total das bactérias presentes na água de lavagem das hortaliças.

Efeito da radiação UV sobre os microrganismos

Os alimentos contaminados representam um sério problema de saúde pública, resultando em perdas econômicas significativas (CORRÊA *et al.*, 2020; HUANG; CHEN, 2020). Diversas bactérias patogênicas, como *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli*, são responsáveis por surtos de doenças de origem alimentar (DOAs), relacionadas ao consumo de alimentos frescos, como frutas, verduras

e produtos cárneos contaminados (MARQUES *et al.*, 2024). Além disso, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) estima que cerca de um terço dos alimentos produzidos são perdidos ou desperdiçados, devido às condições inadequadas de colheita, processamento, armazenamento e transporte, que predispõe à contaminação microbiana e redução da vida útil (CORRÊA *et al.*, 2020).

A radiação UV é tradicionalmente utilizada para descontaminação do ar, superfícies e água. Entretanto, a indústria alimentícia tem explorado cada vez mais essa tecnologia para inativação microbiana em alimentos sólidos e líquidos, devido a sua capacidade de destruir patógenos e microrganismos deterioradores (DELORME *et al.*, 2020). Dessa forma, a radiação UV surge como alternativa promissora para ser empregada em substituição aos tratamentos convencionais de sanitização, com reduzido impacto ambiental e nas características gerais dos alimentos tratados (MARQUES *et al.*, 2024).

Diversos mecanismos estão implicados na inativação microbiana através da radiação UV (DELORME *et al.*, 2020). A radiação UV leva a danos na membrana celular e destruição do material genético, causando a morte dos microrganismos (WANG *et al.*, 2023). Vale ressaltar que o efeito do tratamento com UV pode variar entre espécies diferentes, estágio de crescimento, estágio de cultura, linhagem do microrganismo e composição do alimento (CRUZ *et al.*, 2022).

A luz UV de comprimento longo (UV-A) possui maior capacidade de penetração que a UV-B e UV-C, entretanto é pouco absorvida pelo DNA. Dessa forma, seus efeitos sobre a inativação de microrganismos são indiretos. As ondas UV-A podem provocar estresse oxidativo, danos às proteínas, oxidação de ácidos graxos insaturados, retardo do crescimento celular e redução do metabolismo energético que causam danos sobre a membrana celular. A luz UV de comprimento de onda médio (UV-B) também apresenta efeito bactericida indireto, causando segregação de DNA em solução aquosa e células, além de produção de dímeros de pirimidina cis-cis-ciclobutano

juntamente com uma pequena quantidade de pirimidina (6-4) fotoprodutos de pirimidina (6-4 PPS) que causam lesões e defeitos no DNA (WANG *et al.*, 2023).

O comprimento de onda curto (UV-C), por sua vez, contém energia que é capaz de destruir diretamente o DNA, sendo o comprimento de onda mais letal para os microrganismos. Por essa razão, é amplamente utilizado na indústria alimentícia para a esterilização de água e alimentos (AKHILA *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023). O comprimento de onda curta (200-280 nm) compreende o pico de absorção do DNA, tendo efeito máximo entre 250-260 nm. Os fótons produzidos nesse comprimento de onda são amplamente absorvidos pelas bases nitrogenadas timina e citosina do DNA (DELORME *et al.*, 2020). A radiação UV-C resulta em deslocamento físico de elétrons e quebra de ligações do DNA, interrompendo a transcrição e replicação do material genético, alterando seu metabolismo e reprodução (CRUZ *et al.*, 2022; DELORME *et al.*, 2020).

A absorção da radiação UV-C resulta na produção de fotoprodutos denominados dímeros de ciclobutano pirimidina (CPD) e fotoprodutos de pirimidina 6-4 pirimidona (6-4PP). O dímero de pirimidina é formado entre moléculas de pirimidina adjacentes na mesma fita de DNA, interrompendo a transcrição e replicação, levando à morte celular. Além disso, as células também sofrem com os efeitos indiretos da radiação UV-C, como a formação de radicais livres e íons que geram estresse nas proteínas da membrana, resultando em alterações na atividade enzimática e danos à membrana citoplasmática (DELORME *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2023).

É importante destacar que diferentes microrganismos requerem doses letais diferentes, específicas de cada espécie. Dessa forma, as características da microbiota a ser destruída devem ser levadas em consideração para a eficiência do tratamento. Além disso, o tamanho da célula microbiana, a formação de pigmentos e fotoprodutos, a reparabilidade do DNA e a composição, tamanho e conformação

do material genético também influenciam na eficiência do processo (DELORME *et al.*, 2020).

As bactérias gram-positivas tendem a ser mais resistentes à UV-C, devido a presença de uma camada mais espessa de peptidoglicano na parede celular, que dificulta a absorção e penetração dos fótons da luz UV nas células. As leveduras, por sua vez, apresentam células grandes e menor teor de pirimidina no DNA, representando maior resistência UV que as bactérias. Esporos fúngicos e bacterianos também podem apresentar resistência devido ao seu estado desidratado que reduz a dimerização da pirimidina. Além disso, esporos fúngicos são pigmentados, protegendo-os da radiação UV (DELORME *et al.*, 2020).

Os microrganismos ainda possuem capacidade de reparar os danos induzidos por UV e sobreviverem mesmo após o tratamento. A formação dos dímeros de pirimidina podem ser revertidos por dois mecanismos de reparo, a fotorreativação e o reparo escuro, a partir de enzimas liases, capazes de reverter o dano causado via absorção de luz visível em comprimentos de onda de 350-500 nm (CRUZ *et al.*, 2022; DELORME *et al.*, 2020). Assim, condições adequadas de armazenamento, como evitar a exposição à luz visível, devem ser adotadas para garantia de efetividade do processamento.

A luz UV tem sido utilizada em diferentes tipos de produtos, principalmente para a inativação de microrganismos. Um artigo de revisão destacou que o uso da radiação UV não causou efeitos adversos no leite e derivados quando utilizada em quantidades moderadas. No entanto, a aplicação de doses excessivas pode levar a perdas nutricionais e formação de compostos indesejáveis (DELORME *et al.*, 2020). Corrêa *et al.* (2020) demonstraram que a radiação UV-C teve efeito antimicrobiano e reduziram a contaminação de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* em superfícies de carnes e frutas.

Wang *et al.* (2023) também observaram aumento da vida útil devido à redução efetiva de microrganismos em carne e produtos cárneos, principalmente quando combinado com a tecnologia de

barreiras, como embalagem com eliminador de oxigênio, vácuo e/ou alta pressão. HUANG e CHEN (2020) demonstraram que quando os produtos eram lavados sob agitação com lâmpadas UV submersíveis e de teto, o tratamento foi capaz de eliminar >6 log de *Salmonella* spp. suspensa em água de lavagem contendo níveis muito altos de demanda química de oxigênio (DQO) e turbidez. Além disso, também demonstrou redução significativa do patógeno em superfícies de mirtilos e tomates.

Outro estudo demonstrou o efeito da radiação UV na descontaminação de *Aspergillus flavus* e aflatoxina B1 em milho e amendoim. A classe de aflatoxinas compreende uma toxina termoestável produzida por fungos do gênero *Aspergillus* que possui potencial carcinogênico. As amostras de milho e amendoim foram expostas à irradiação UV-C com uma dose total na faixa de 1080-8370 mJ/cm². A maior redução da contagem de *A. flavus* foi de 4,4 log UFC/g no milho e de 3,1 log UFC/g no amendoim. Além disso, o nível de redução de toxina no milho chegou a 43% e no amendoim a 51%. Importante mencionar que os testes sensoriais e análises instrumentais de cor e textura das amostras de amendoim mostraram apenas alterações mínimas (UDOVICKI *et al.*, 2022).

A eficácia da irradiação UV-C na segurança microbiológica e qualidade de folhas de louro secas foi investigada, avaliando seu efeito sobre *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Listeria monocytogenes* e *Staphylococcus aureus*. A aplicação de uma dose de 3.942 mJ/cm² resultou em reduções microbianas entre 2,70 e 3,93 log UFC/g, sendo a *Pseudomonas aeruginosa* a mais resistente à UV-C. Adicionalmente, mesmo quando submetidas a doses mais elevadas (até 13.662 mJ/cm²), as folhas de louro não apresentaram alterações significativas em sua cor e propriedades sensoriais visuais (GABRIEL; MELO; MICHELENA, 2020).

Contudo, outro estudo avaliou a eficácia da radiação UV-C como método de descontaminação para os mesmos patógenos em grãos de pimenta-do-reino, utilizando uma irradiância superficial

de 0,43 mW/cm². Entre as bactérias testadas, o *Staphylococcus aureus* demonstrou maior resistência ao tratamento. Além disso, o aumento no número de lâmpadas de 1 para 5 resultou em um incremento linear na irradiância superficial do tratamento. A análise colorimétrica detectou alterações significativas nas coordenadas de cor, porém essas mudanças não foram perceptíveis em testes sensoriais realizados por um painel de 50 avaliadores (GABRIEL *et al.*, 2020).

Em alimentos líquidos, o efeito antimicrobiano de diodos emissores de luz UV-C contra *Saccharomyces cerevisiae* na descontaminação de suco de laranja foi testado. Os resultados demonstraram uma correlação positiva entre o aumento da dose de radiação e a eficácia do tratamento, sendo observada redução de 4,44 log UFC/mL após aplicação de 1.420 mJ/cm². As análises físico-químicas revelaram que o tratamento não afetou significativamente o pH, os sólidos solúveis totais (°Brix), a acidez titulável ou os parâmetros de cor (L*, a*, b*). Contudo, verificou-se redução significativa no teor de compostos fenólicos totais, indicando sensibilidade desses componentes bioativos à radiação UV-C (NIU *et al.*, 2021).

Em síntese, a UV-C mostra-se uma alternativa promissora para descontaminação de alimentos, com eficácia dependente do patógeno e dos parâmetros operacionais adotados. A preservação das características sensoriais, observada mesmo após altas doses, é um trunfo significativo, porém sua aplicação deve ser contextualizada como parte de um sistema integrado de conservação.

Os achados mencionados reforçam a necessidade de validação específica para cada matriz alimentar, considerando: (a) a sensibilidade dos patógenos-alvo; (b) a estabilidade das características organolépticas; e (c) o equilíbrio entre eficácia microbicida e preservação da qualidade do produto. A otimização dos protocolos e estudos de sinergia com outras tecnologias emergem como caminhos prioritários para viabilizar sua adoção em maior escala.

Considerações finais

A aplicação da radiação ultravioleta (UV) tem-se destacado como uma alternativa promissora e sustentável para a descontaminação de alimentos, reduzindo a presença de microrganismos patogênicos e deterioradores. Seu uso como tecnologia não térmica e não química proporciona vantagens significativas em relação a métodos convencionais, garantindo maior preservação das características nutricionais e sensoriais dos alimentos. Contudo, a eficácia do tratamento com UV depende de diversos fatores, como o comprimento de onda utilizado, a intensidade da radiação, o tempo de exposição e as características do alimento. A baixa capacidade de penetração da luz UV exige cuidados na aplicação, especialmente para produtos líquidos com alta turbidez, o que pode tornar sua utilização limitada para determinados tipos de alimentos.

O desenvolvimento contínuo de novas tecnologias, como o uso de LEDs UV, tem potencial para otimizar a aplicação da radiação UV na indústria de alimentos, tornando-a ainda mais eficiente e segura. Além disso, a adoção de sistemas de fluxo contínuo pode contribuir significativamente para a otimização do tratamento. Dessa forma, a radiação UV se apresenta como uma solução inovadora para a indústria alimentícia, contribuindo para a melhoria da qualidade microbiológica dos alimentos, a redução do desperdício e a ampliação da vida de prateleira dos produtos.

Referências

AKHILA, P. P. *et al.* Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: a comprehensive review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 114, p. 399-409, ago. 2021.

- ALENCAR, M. A. P. *et al.* Produção de caixa ultravioleta para pré-tratamento da polpa de maracujá com radiação ultravioleta. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, [s. l.], v. 22, n. 10, p. e7483, 28 out. 2024.
- BALL, D. W. The electromagnetic spectrum: a history. **Spectroscopy**, [s. l.], v. 3, n. 22, p. 14-17, 2007.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução-RDC nº 21, de 26 de janeiro de 2001. Aprova o regulamento técnico para irradiação de alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 jan. 2001. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2001/rdc0021_26_01_2001.html. Acesso em: 23 mar. 2025.
- CORRÊA, T. Q. *et al.* Effects of ultraviolet light and curcumin-mediated photodynamic inactivation on microbiological food safety: a study in meat and fruit. **Photodiagnosis and Photodynamic Therapy**, [s. l.], v. 30, p. 101678, jun. 2020.
- CRUZ, P. L. *et al.* Tecnologia de irradiação ultravioleta em alimentos: conceito e aplicação. In: SILVA, C. O.; TEIXEIRA, L. J. Q.; FILHO, T. L. (org.). **Tecnologia de alimentos: processamento não térmico**. 1. ed. Rio de Janeiro: Rubio, 2022.
- DELORME, M. M. *et al.* Ultraviolet radiation: an interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 102, p. 146-154, ago. 2020.
- FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). **Irradiation in the production, processing and handling of food**. [S. l.]: FDA, 2000. Disponível em: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2000-10-30/pdf/00-27735.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- GABRIEL, A. A. *et al.* Decontamination of dried whole black peppercorns using ultraviolet-c irradiation. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 88, p. 103401, 1 jun. 2020.
- GABRIEL, A. A.; MELO, K. M. D.; MICHELENA, J. C. D. Determination of the utility of ultraviolet-C irradiation for dried bay

- leaves microbial decontamination through safety and quality evaluations. **LWT**, [s. l.], v. 117, p. 108634, 1 jan. 2020.
- GUI, X.; SHANG, B.; YU, Y. Applications of electrostatic spray technology in food preservation. **LWT**, [s. l.], v. 190, p. 115568, dez. 2023.
- HASSOUN, A. *et al.* Food traceability 4.0 as part of the fourth industrial revolution: key enabling technologies. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 64, n. 3, p. 873-889, 25 jan. 2024.
- HINDS, L. M. *et al.* Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 56, p. 102153, ago. 2019.
- HUANG, R.; CHEN, H. Use of 254 nm ultraviolet light for decontamination of fresh produce and wash water. **Food Control**, [s. l.], v. 109, p. 106926, 2020.
- KOCA, N.; URGU, M.; SAATLI, T. E. Ultraviolet light applications in dairy processing. *In*: KOCA, N. (ed.). **Technological approaches for novel applications in dairy processing**. [S. l.]: InTech, 2018.
- LIN, X. *et al.* Smart windows based on ultraviolet-B persistent luminescence phosphors for bacterial inhibition and food preservation. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 448, p. 139142, ago. 2024.
- MAHMOUD, M. Z. *et al.* The benefits, drawbacks, and potential future challenges of the most commonly used ultrasound-based hurdle combinations technologies in food preservation. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 206-212, 2022.
- MARQUES, A. P. *et al.* Enhancing food safety: employing ultraviolet-C light emitting diodes for water, leaf, and surface disinfection. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 98, p. 103848, 2024.

- MOGHADDAM, S.; ASADI, M.; KHALILI, K. Investigating the effect of UVC-LED reactor configurations on liquid foods disinfection using computational fluid dynamics. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 112138, 2024.
- NIU, L. *et al.* Antimicrobial effect of UVC light-emitting diodes against *Saccharomyces cerevisiae* and their application in orange juice decontamination. **Journal of Food Protection**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 139-146, 2021.
- RAMÍREZ-CORONA, N. Implementing process intensification principles for food processing by emerging technologies. **Chemical Engineering and Processing – Process Intensification**, [s. l.], v. 205, p. 109981, 2024.
- SINGH, H. *et al.* UVC radiation for food safety: an emerging technology for the microbial disinfection of food products. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 417, p. 128084, 2021.
- TADESSE, E. E. *et al.* Application of UV-A and blue light emitting diodes within the range of 320–480 nm on quality and shelf-life extension of food products. **Food and Bioprocess Processing**, [s. l.], v. 148, p. 436-455, 2024.
- TANG, X. *et al.* Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (UV) exposure: friends and foes to the skin and beyond the skin. **Environment International**, [s. l.], v. 185, p. 108535, 2024.
- UDOVICKI, B. *et al.* Evaluation of ultraviolet irradiation effects on *Aspergillus flavus* and Aflatoxin B1 in maize and peanut using innovative vibrating decontamination equipment. **Food Control**, [s. l.], v. 134, p. 108691, 2022.
- WANG, J. *et al.* Ultraviolet-radiation technology for preservation of meat and meat products: recent advances and future trends. **Food Control**, [s. l.], v. 148, p. 109684, 2023.

Utilização de subprodutos do processamento de frutas e hortaliças na elaboração de novos produtos alimentícios

Rhaiza Marcia Passos Leal • Laura Aparecida Perim da Cruz •

Livia Araújo Silva • Ana Paula Rosa do Amaral •

Maira Amaro Pereira • Jackline Freitas Brilhante de São José

Atualmente, aproximadamente 1,3 bilhão dos alimentos produzidos em âmbito mundial para consumo humano são desperdiçados, sendo que frutas e hortaliças correspondem a 50% (FAO, 2015; FAO, 2019). No Brasil, aproximadamente 26 milhões de toneladas de alimentos são desperdiçados anualmente, dos quais 5,3 milhões de toneladas são de frutas e 5,6 milhões de toneladas de hortaliças (BUENO, 2019).

Estima-se que essas perdas e desperdícios na cadeia produtiva podem chegar a 10% no plantio e colheita, 50% nas etapas de manuseio e transporte e 10% pelo consumidor (BUENO, 2019). Ou seja, perdas e desperdícios ocorrem em toda a cadeia de produção, desde o cultivo até as etapas de preparo em estabelecimentos industriais,

comerciais e residenciais, onde são gerados subprodutos de alto agregado (GANESH; SRIDHAR; VISHALI, 2022).

O termo “subproduto” refere-se às partes não comestíveis dos alimentos, descartadas em diferentes etapas do processo produtivo, como coleta, manuseio, transporte e processamento. Estes subprodutos podem ser utilizados em novos processos e, assim, convertidos em produtos comerciais (DA SILVA *et al.*, 2023). Como a quantidade de resíduos gerados pode atingir toneladas, a recuperação e valorização desses subprodutos é uma tendência emergente, pois o descarte inadequado de subprodutos gera impactos ambientais e econômicos (NASCIMENTO; FRANCO, 2015; OLIVEIRA; PANDOLFI, 2020; BERENGUER *et al.*, 2022).

Os subprodutos gerados são constantemente incorporados em rações animais, descartados em aterros sanitários ou incinerados (ALBIZZATI; TONINI; ASTRUP; 2021; GANESH; SRIDHAR; VISHALI, 2022). Todavia, o descarte inapropriado gera impactos negativos ao meio ambiente, como mau odor e poluição visual, aumento da emissão de gases de efeito estufa, poluição do ar e contaminação dos lençóis freáticos (GANESH; SRIDHAR; VISHALI, 2022; BERENGUER *et al.*, 2023).

Outrossim, também resulta em impactos econômicos devido ao descarte insustentável de subprodutos e inutilização de recursos potenciais contendo macro e micronutrientes e compostos bioativos que podem ser empregados na elaboração de novos produtos alimentícios de modo a agregar no aspecto nutricional (AIOLFI; BASSO, 2012; CARDOSO *et al.*, 2015; BRITO *et al.*, 2019, 2020; OLIVEIRA; PANDOLFI, 2020; de BRITO NOGUEIRA *et al.*, 2020; BERENGUER *et al.*, 2023; SKWAREK; KARWOWSKA, 2023). Assim, a utilização de subprodutos é importante em aspectos ambientais, econômicos, tecnológicos e nutricionais.

A informação sobre os nutrientes encontrados em cascas, talos, folhas, polpas e sementes podem contribuir com a redução do desperdício domiciliar e diminuir os gastos com a alimentação. Em outra

perspectiva, poderá facilitar o acesso da população de baixa renda a alimentos funcionais, com elevado valor nutricional (MACAGNAN *et al.*, 2014). Portanto, o aproveitamento integral dos alimentos propicia um sistema de produção viável, economia circular sustentável e menores impactos socioambientais (UEDA *et al.*, 2022). Deste modo, este capítulo tem como objetivo explorar as possibilidades de aproveitamento dos subprodutos gerados no processamento de frutas e hortaliças, com foco em sua utilização como matéria-prima na criação de novos produtos alimentícios.

Tipos de Subprodutos e fontes

A agroindústria de frutas e hortaliças é um setor relevante na economia mundial, sobretudo a indústria de processamento de frutas. Todavia, é responsável por perdas significativas (LIMA *et al.*, 2023). Para minimizar essas perdas, advindas da alta perecibilidade, manipulação inapropriada, armazenamento e transporte, a indústria realiza o processamento desses produtos, com a finalidade de aumentar a vida útil, manter a qualidade e segurança, bem como inserir no mercado produtos minimamente processados ou convencionais (BRITO *et al.*, 2019; RODRIGUES; SEIBEL, 2021).

Todavia, ao se realizar o processamento, são geradas quantidades significativas de subprodutos como cascas, sementes, caules, folhas, raízes, bagaços e polpa inutilizável (RAMOS; JIMÉNEZ; GARRIGÓS, 2019; UEDA *et al.*, 2022; RATU *et al.*, 2023). Esses subprodutos, muitas vezes, não possuem destino específico, tornando-se contaminantes ambientais e consequentemente, gerando custos operacionais às empresas, pois necessitam de tratamento para o descarte (INFANTE *et al.*, 2015).

A produção de sucos e polpas gera cerca de 30 a 40% de resíduos de frutas (RF) (RANDOLPHO *et al.*, 2020). Ainda, produtos minimamente processados e doces e produtos de confeitaria também geram

subprodutos. sendo estes alvos de pesquisas da indústria farmacêutica e de cosméticos, e principalmente da indústria alimentícia para o desenvolvimento de novos produtos (TAPIA-RODRIGUEZ *et al.*, 2028; BRITO *et al.*, 2020).

No Brasil, as agroindústrias que produzem sucos têm um padrão bem definido de frutas predominantes em seus produtos, o que as torna as principais geradoras de subprodutos. Entre as principais frutas utilizadas, destacam-se o maracujá, a laranja e a uva (DO NASCIMENTO FILHO; FRANCO, 2015; SARAIVA *et al.*, 2018). Além disso, outras frutas e hortaliças também geram quantidades substanciais de subprodutos. A Tabela 1 apresenta os dados referentes aos subprodutos provenientes de algumas frutas e hortaliças, assim como os volumes resultantes do processamento desses alimentos.

Tabela 1: Alimentos processados, subprodutos e volume gerados

Alimento processado	Subproduto	Volume gerado	Referência
Alho	Casca	25%	Dos Santos <i>et al.</i> , 2022 ^a
Alcachofra	Folhas, caules e brácteas	80%	Proetto <i>et al.</i> (2024)
Abacate	Casca e semente	21-30%	Velderrain-Rodríguez <i>et al.</i> , 2021
Abacaxi	Cascas e coroa	50%	Franklyn da Cruz <i>et al.</i> , 2018
Banana	Casca	30%	Šeremet <i>et al.</i> , 2022
Batata	Casca	15 a 40%	Jimenez-Champi <i>et al.</i> , 2023
Beterraba	Casca	35-40%	Fernando <i>et al.</i> , 2021
Cenoura	Bagaço (cascas)	50%	Luca <i>et al.</i> , 2021
Jabuticaba	Casca, sementes e polpa aderida	40%	Benvenuti <i>et al.</i> , 2021
Laranja	Casca, semente, polpa	50 a 54%	Li <i>et al.</i> , 2023; Dassoﬀ <i>et al.</i> , 2021

continua

Alimento processado	Subproduto	Volume gerado	Referência
Maçã	Casca, semente, caule e polpa	30%	Caliceti <i>et al.</i> , 2022
Manga	Casca e semente	60%	Oliver-Simancas <i>et al.</i> , 2021
Maracujá	Casca	60-74%	Dos Santos <i>et al.</i> , 2023b
Romã	Casca	50%	Parafati <i>et al.</i> , 2021
Romã	Cascas e sementes	54%	Mohlamonyane <i>et al.</i> , 2024
Tomate	Casca, polpa e semente	5%	Palomo <i>et al.</i> , 2019
Tomate	Casca, semente e frações de polpa	10-30%	Salanță; Fărcaș, 2024
Uva	Bagaço	30%	Wang <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tecnologias de processamento dos subprodutos de frutas e hortaliças

O descarte de subprodutos dos alimentos de origem vegetal acaba por favorecer o desperdício de materiais ricos em compostos bioativos (polifenóis, carotenoides, fibras e lipídios) que podem ser utilizados no desenvolvimento de novos produtos alimentícios (SANTOS; SANTANA, 2022; ROMERO-MARTÍNEZ *et al.*, 2025). Após a obtenção dos subprodutos é preciso avaliar se eles precisarão passar por algum processo de extração para obtenção dos compostos de interesse ou se os subprodutos poderão ser aplicados diretamente nos novos produtos.

Existem vários métodos que podem ser utilizados no processo de extração de compostos bioativos. Os mais utilizados fazem parte dos métodos tradicionais, são eles: solventes orgânicos (líquido-líquido/

líquido-sólido), maceração, extração por Soxhlet, percolação, decocção e hidrodestilação (BANERJEE *et al.*, 2017; SORRENTI *et al.*, 2023). Apesar de serem muito utilizados, existem desvantagens que estão associadas aos métodos tradicionais, como utilização de solventes com alta pureza, risco de degradação térmica dos componentes termolábeis e tempos de extração prolongados, potencial toxicidade, alto custo, elevadas quantidades de solventes e baixa seletividade (BANERJEE *et al.*, 2017; SORRENTI *et al.*, 2023).

A seleção do método de extração é crítica, pois as propriedades químicas e físicas dos compostos bioativos, determinam fortemente os métodos de extração e as condições a serem aplicadas. Assim, é importante considerar o impacto ambiental destes processos, pois não faria sentido o uso de processos não sustentáveis para a valorização de subprodutos de processamento (CASSANI; GOMEZ-ZAVAGLIA, 2022).

A fim de reduzir as desvantagens da utilização dos métodos, as tecnologias emergentes, denominadas métodos de extração verde, vêm sendo estudadas como uma possível alternativa para eliminação de solventes potencialmente tóxicos, redução dos impactos ao meio ambiente e que sejam seguros para alimentos (GLIŠIĆ *et al.*, 2023). Ademais, como o intuito de uso dos subprodutos muitas vezes é a aplicação em novos produtos alimentícios, utilizar métodos mais limpos reduzem possíveis riscos. Entre os métodos de extração verde, pode-se citar a extração assistida por ultrassom, extração assistida por micro-ondas, extração de fluido supercrítico, extração de líquido pressurizado, extração assistida por enzimas, extração com alta pressão hidrostática, extração assistida por infravermelho, extração por campo elétrico pulsado (GLISIC *et al.*, 2023; MUNTEAN *et al.*, 2022; KULTYS E KUREK., 2022; TESHOME *et al.*, 2023; SORRENTI *et al.*, 2023; HERRERO *et al.*, 2024; ROMERO-MARTÍNEZ *et al.*, 2025).

Além dos métodos citados anteriormente, uma possibilidade é o método de fermentação. A fermentação é um processo de baixo custo, baixo consumo energia e geração de águas residuais, sendo uma forma promissora de aproveitar subprodutos oriundos do processamento de

frutas e hortaliças (SAADOUN *et al.*, 2021; SILVA; TANIWAKI; SÁ, 2022). A fermentação é uma tecnologia importante que usa diferentes microrganismos para a transformação de subprodutos de frutas e hortaliças em diferentes ingredientes de valor agregado, como ácidos orgânicos, pigmentos, enzimas, proteína unicelular, antioxidantes, polifenóis, biocombustível, antibióticos, por meio de bioprocessos de baixo custo, sustentável e de alto rendimento (DINANI E VAN DER GOOT, 2023). Assim, aumenta-se a proporção dos ingredientes de valor agregado, facilitando o processo de extração que poderá ser aplicado em seguida.

Além disso, segundo Dinani e van der Goot (2023), para agilizar o uso de subprodutos em diferentes alimentos, em vez de adicionar compostos extraídos ou extratos, uma opção é adicioná-los diretamente às formulações de alimentos em proporções adequadas. Neste caso, é preciso que seja avaliada previamente a segurança microbiológica e qualidade nutricional do subproduto. Ao usar essa estratégia, o processo de extrusão pode ser uma possibilidade para uso direto de subprodutos de frutas e hortaliças em alimentos como cereais matinais, massas, produtos de panificação ou lanches. Ainda, estes subprodutos podem ser adicionados diretamente como ingredientes no processo de produção de biscoitos, bolos, pães, queijos, etc. (DINANI E VAN DER GOOT, 2023)

Vale destacar ainda que, ao adotar qualquer um destes procedimentos supracitados, é muito importante estabelecer a melhor porcentagem dos subprodutos a serem adicionados nos alimentos porque as altas concentrações podem diminuir a aceitação do consumidor. Além disso, a qualidade microbiológica e a segurança dos novos produtos alimentícios elaborados após a adição de subprodutos também precisam ser verificadas cuidadosamente (DINANI E VAN DER GOOT, 2023).

Avaliação da qualidade nutricional e funcional de subprodutos do processamento de frutas e hortaliças

Durante a fabricação, processamento e consumo de frutas e hortaliças, partes desses alimentos consideradas não comestíveis são frequentemente descartadas devido ao sabor ou à textura desfavoráveis (LAU; SABRAN; SHAFIE, 2021). Estima-se que essa cadeia produtiva gere cerca de 25-30% de resíduos alimentares, posicionando esse grupo de alimentos como o segundo com maior perda pós-colheita até a distribuição (FAO, 2019; VARZAKAS; ZAKYNTHINOS; VERPOORT, 2016).

Entre os principais subprodutos agroindustriais, destacam-se a polpa, casca, sementes, bagaço, caules e talos, os quais podem representar mais de 50% da matéria-prima inicial. Por incorporarem biomoléculas, essas partes muitas vezes possuem maior teor de proteínas, vitaminas, minerais e compostos antioxidantes do que o próprio produto final (RATU *et al.*, 2023).

Por conseguinte, muitos estudos destacaram nos últimos anos que os subprodutos agroalimentares têm imenso potencial para serem usados em diversas aplicações no âmbito alimentício (RATU *et al.*, 2023). Sendo assim, devido às valiosas propriedades tecnológicas e nutricionais desses resíduos, utilizá-los adequadamente pode trazer benefícios econômicos significativos aos processadores de alimentos e fornecer potenciais benefícios à saúde dos consumidores (SKWAREK; KARWOWSKA, 2023).

Um dos principais componentes encontrados nesses resíduos são as fibras alimentares, presentes em altas concentrações em cascas e bagaços de frutas, o que pode ser explicado devido à composição polissacarídica da parede celular dos vegetais, caracterizada pela presença da celulose, hemicelulose e da pectina — principais componentes das fibras alimentares (LAU; SABRAN; SHAFIE, 2021; RATU *et al.*, 2023). O bagaço de maçã e tomate contém, respectivamente,

51,1% e 64,1% de fibra alimentar total, enquanto as cascas de frutas cítricas, manga e tomate apresentam teores ainda mais elevados, dispondo, nesta ordem, de 67,4%, 69,9% e 86,2% (RATU *et al.*, 2023).

Além de melhorarem a função intestinal, as fibras exercem efeitos positivos sobre a glicemia pós-prandial, colesterol plasmático, saciedade e microbiota intestinal, além de estarem associadas à redução do risco de doenças crônicas não transmissíveis e por isso são consideradas alimentos funcionais (PHILIPPI, 2018). Logo, a presença de fibras alimentares nos subprodutos pode agregar qualidade nutricional aos produtos alimentícios desenvolvidos com a sua adição.

Além das fibras, proteínas também estão presentes em quantidades consideráveis em alguns destes subprodutos, sendo essenciais para funções metabólicas e manutenção tecidual. Exemplos incluem o bagaço de cenoura (10,06 g/100 g), resíduos sólidos de tomate (17-22 g/100 g) e folhas de repolho (20,4 g/100 g), que podem representar alternativas viáveis para enriquecimento proteico de produtos alimentícios (RATU *et al.*, 2023).

Outro grupo importante de compostos bioativos presentes nos resíduos agroindustriais são os antioxidantes naturais, como os compostos fenólicos, que desempenham papel fundamental na neutralização de radicais livres. Esses metabólitos vegetais apresentam propriedades anticancerígenas, antimicrobianas e anti-inflamatórias, sendo amplamente encontrados em cascas e bagaços de frutas e hortaliças. No entanto, sua biodisponibilidade depende de fatores como a estrutura do alimento e o processamento ao qual foi submetido (CICCORITTI *et al.*, 2024). Para melhor compreensão da absorção desses compostos, os polifenóis são classificados em extraíveis e não extraíveis. Os primeiros são de baixo peso molecular e facilmente liberados da matriz alimentar, podendo ser parcialmente absorvidos no intestino delgado. Já os não extraíveis estão fortemente ligados às paredes celulares e chegam quase intactos ao cólon, onde podem ser metabolizados pela microbiota intestinal, exercendo benefícios adicionais à saúde (NÚÑEZ-GÓMEZ; GONZÁLEZ-BARRIO; PERIAGO, 2023).

As cascas de frutas e hortaliças são particularmente ricas em compostos fenólicos, com concentrações significativamente superiores às encontradas na polpa. A casca de laranja, por exemplo, demonstrou proteger células do sistema imunológico contra danos no DNA, além de reduzir processos inflamatórios (FIERASCU *et al.*, 2020). Outros subprodutos, como cascas de banana, manga e uva, também apresentam alto teor de compostos fenólicos e forte atividade antioxidante (RATU *et al.*, 2023).

Além dos compostos fenólicos, os subprodutos de frutas e hortaliças são fontes naturais de pigmentos bioativos, como carotenoides e clorofilas. Os carotenoides, responsáveis pelas colorações amarelo, laranja e vermelho, possuem efeitos benéficos na prevenção de doenças cardiovasculares, câncer e distúrbios metabólicos. No entanto, sua biodisponibilidade é influenciada pela matriz alimentar, sendo favorecida pelo cozimento e pela presença de gorduras, embora altas temperaturas possam levar à degradação desses compostos (NÚÑEZ-GÓMEZ; GONZÁLEZ-BARRIO; PERIAGO, 2023).

As clorofilas, por sua vez, conferem coloração verde aos vegetais e exibem propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias. Estudos identificaram altos teores desses pigmentos em cascas de pepino e cenoura preta, destacando o potencial desses resíduos na formulação de novos produtos funcionais (CICCORITTI *et al.*, 2024).

Diante desse panorama, fica evidente que os subprodutos agroindustriais possuem elevado valor nutricional e funcional, podendo ser reaproveitados para promover benefícios à saúde e reduzir o desperdício alimentar. Portanto, o aprofundamento dos estudos sobre suas propriedades tecnológicas e aplicações se faz essencial para maximizar seu aproveitamento na indústria de alimentos.

Utilização de subprodutos de frutas e hortaliças na elaboração de novos produtos Alimentícios

No processamento de frutas e hortaliças, os subprodutos originados apresentam alto teor de compostos bioativos, sendo uma alternativa sustentável para o desenvolvimento de novos produtos ou para melhoria das características de produtos já existentes (VAN DER GOOT *et al.*, 2016).

Existem algumas áreas do setor alimentício que possuem potencial para utilização desses resíduos sendo estas: produtos de panificação, produtos cárneos e produtos lácteos.

Produtos de panificação

Em produtos de panificação existem estudos que indicam que o acréscimo desses subprodutos podem melhorar a qualidade dos alimentos e diversificar aspectos sensoriais dos novos produtos alimentícios elaborados. A seguir serão apresentados alguns estudos que ilustram essa potencialidade de uso de subprodutos na elaboração de pães, bolos, biscoitos e barras de cereal.

Kasprzak e Rzedzicki (2010) avaliaram o efeito da adição de cascas de ervilha nos parâmetros tecnológicos, físico-químicos, centesimais e sensoriais de pão feito com farinha de trigo branca. Os autores observaram que a adição de até 10% de cascas de ervilha aumentam os teores de fibras, cinzas e proteínas. Além disso, propicia aumento no rendimento da preparação, mantém propriedades físicas e características sensoriais satisfatórias.

De acordo com Santos *et al.* (2018), a adição da farinha mista de casca e semente de mamão melhoraram o valor nutricional dos pães de forma integral, isso ocorre pelo aumento dos teores de fibras totais e proteína e pela diminuição do teor de lipídeos. Além disso, houve

diminuição da qualidade tecnológica, cor e firmeza dos pães de forma integral, porém sem alteração sensorial.

Urrutia *et al.* (2019) utilizaram na preparação de bolo uma farinha originada a partir de cascas e bagaço de laranja, obteve-se uma preparação rica em polifenóis e fibras altamente nutritivas. A desvantagem encontrada foi em relação ao bagaço que acaba deixando a farinha com amargor.

Conceição *et al.* (2022) avaliaram formulações de pão fortificado com farinha do resíduo do pedúnculo do caju quanto às características físico-químicas e sensoriais. A formulação de a 10-16% de farinha do pedúnculo do caju apresentou valores menores de pH e acidez e foi a formulação que obteve maior aceitação global (7,05) na escala hedônica e intenção de compra (4,05) quando comparada às médias de notas das demais amostras. Ainda, esta mesma formulação obteve índice de aceitação igual 77,8% sendo superior ao pão controle (58,90%).

Xin *et al.* (2022) avaliaram os efeitos da adição de 5% a 25% de fibra alimentar de subproduto de suco de lichia (FPL) nas características de qualidade e na microestrutura de pão. Os autores observaram que o volume do pão com 5% a 15% de FPL foi significativamente maior do que o do pão com 20% e 25% de FPL. A maior quantidade de FPL deixou a estrutura do pão mais densa, sendo observado maior aumento da dureza e diminuição da elasticidade do pão. Os autores destacaram ainda que a adição apropriada de FPL aumentou a gomosidade e melhorou a mastigabilidade do pão. Nossos resultados indicam que amostras de pão com FPL de 15% de tamanho de partícula específico eram ricas em fibra alimentar.

Em outro estudo que também visou elaborar pães utilizando subprodutos de origem vegetal, Gaglio *et al.* (2023) buscaram avaliar a utilização de subprodutos da prensagem a frio de sementes de framboesa vermelha como ingrediente funcional. Nesta pesquisa, os autores produziram pão substituindo a mistura de farinha de trigo/semolina por 5% ou 10% de resíduos de sementes de framboesa e

verificaram que esse novo ingrediente aumentou significativamente o conteúdo de compostos polifenólicos, particularmente proantocianidinas, e a capacidade antioxidante das massas. Além disso, o volume específico dos pães diminuiu com a adição dos diferentes percentuais de resíduos adicionados. A dureza do miolo aumentou na medida em que houve aumento da quantidade de resíduo adicionada, pois subprodutos vegetais interferem na formação da rede de glúten. Ainda, a cor da crosta e do miolo, a intensidade do odor e aroma, a adstringência e a persistência do sabor aumentaram de acordo com a proporção de resíduos adicionada. E, por fim, os autores verificaram que pães com 5% de resíduos obtiveram maior aceitação sensorial.

Proetto *et al.* (2024) elaboraram duas farinhas obtidas de caules e brácteas de alcachofra “Violetto Catanese” na elaboração de pão sem glúten. As farinhas elaboradas apresentaram um teor médio total de fibras igual a $55,45 \pm 0,33\%$ e $58,23 \pm 0,32\%$, respectivamente. Em comparação ao pão controle, a adição de 7% de farinha de talos de alcachofra e farinha de brácteas de alcachofra não ocasionou nenhuma variação significativa no volume (cm^3), peso (g) e volume específico (cm^3/g) dos pães. Os autores consideraram que a adição de 7% dessas farinhas permite obter um pão com teor potencial de fibras de até 6%, sem influenciar nas características físico-químicas em comparação ao pão controle. Além disso, o pão experimental obtido apresentou elevada quantidade de polifenóis totais que parecem resistentes ao processo de cozimento e determinaram um aumento na atividade antioxidante do pão.

Çağindi *et al.* (2023) realizaram um estudo com objetivo avaliar a incorporação de farinha de semente de melão como substituto da farinha de trigo integral e da gordura em formulações de bolos em concentrações de 40% e 60% para melhorar as propriedades nutricionais dos bolos, aumentando teor de fibras, gordura e proteína. Os resultados das análises de aminoácidos indicaram que a farinha de semente de melão é rica em ácido glutâmico e glicina. Além desses aminoácidos, os aminoácidos essenciais leucina e fenilalanina também

foram encontrados em altos níveis. Vale ressaltar ainda que o teor de potássio e magnésio foi cerca de cinco vezes maior do que o controle. Em relação ao desenvolvimento do bolo com a adição da farinha de semente de melão, verificou-se que não houve uma mudança significativa nas propriedades estruturais dos bolos, mas reduziu a firmeza, elasticidade e mastigabilidade. Além disso, a dureza nos grupos contendo 40% e 60% de sementes de melão apresentou uma diminuição significativa em comparação ao bolo controle. Os resultados das medições físicas indicaram uma diminuição estatisticamente significativa no volume do bolo adicionado da concentração de 60% de farinha de semente de melão. Com base na análise sensorial, os bolos com 40% da farinha de semente de melão obtiveram aceitação semelhante aos bolos com apenas farinha de trigo.

Teixeira e colaboradores (2017) avaliaram a inserção de farinha de casca de beterraba em *cookies*. Os resultados demonstraram que a adição de 18,75% propiciou aumento nos teores de cinzas e fibras, bem como redução dos teores lipídicos e energéticos. Além disso, os autores concluíram que na proporção anteriormente mencionada, os *cookies* foram bem aceitos pelos provadores, com aceitação similar à formulação controle.

Jose *et al.* (2022) estudaram a incorporação de diferentes concentrações de pó de bagaço de abacaxi no desenvolvimento de biscoitos. Os autores observaram que o teor de fibras aumentou, ao passo que o teor de gordura reduziu. Além disso, o pó de bagaço melhorou a atividade antioxidante dos biscoitos, sendo um ingrediente alimentar promissor no desenvolvimento de novos produtos.

Perez e colaboradores (2018) desenvolveram biscoitos com bagaço de mirtilo e observaram que os biscoitos apresentaram maiores teores de fibras, além de maiores teores de capacidade antioxidante e conteúdo de polifenóis quando comparado com o biscoito de controle. Todavia, a aceitabilidade do biscoito enriquecido com fibra atingiu um valor de 5,3 em uma escala hedônica de nove pontos, indicando que novas estratégias de inserção devem ser analisadas.

Faiom, Savoldi e Mattiello (2021) desenvolveram duas barras de cereais com adição de farinha de ora-pro-nóbis e casca de abacaxi (F1 – chá das cascas reduzidas com açúcar mascavo e F2 – filtrado das cascas reduzido com açúcar mascavo) utilizada como porção ligante. As autoras observaram que as barras de cereais produzidas obtiveram maiores valores de proteínas quando comparadas às barras tradicionais. A barra de cereais produzida com chá da casca de abacaxi apresentou melhor aceitação sensorial.

Produtos cárneos

A utilização de subprodutos de frutas e hortaliças, como bagaço ou cascas ricas em polifenóis, flavonoides, vitaminas e fibras alimentares, como ingredientes em novos produtos cárneos tem sido explorada. Eles fornecem compostos que têm propriedades valiosas e reduzem o impacto ambiental negativo causado pelo descarte de uma parte significativa da fruta (sementes e cascas) (SKWAREK; KARWOWSKA *et al.*, 2023; GRASSO *et al.*, 2024)

Em produtos cárneos os subprodutos são utilizados para diversas funções, como evitar a oxidação lipídica, aumentar a vida útil do produto, aumentar o teor de fibras, adicionar compostos fenólicos e polifenólicos e melhorar a capacidade antioxidante. A seguir serão apresentados alguns estudos que demonstram a aplicabilidade de subprodutos de frutas e hortaliças na elaboração de novos produtos cárneos.

Alguns estudos têm avaliado a adição de subprodutos em substituição ao teor de gordura. Santos *et al.* (2018) analisaram a substituição parcial (50%) ou total (100%) da gordura por farelo de resíduo do cajá (FRC) e observaram alteração nos valores de umidade, cinzas e lipídios. Ademais, a adição de diferentes proporções de FRC promoveu alteração dos parâmetros de cor à medida que houve aumento da substituição da gordura. Ao final, os autores concluíram que a adição

de 50% de farelo de resíduo de cajá resultou em melhores parâmetros de qualidade. Zhao *et al.* (2020) avaliaram a adição de fibra alimentar insolúvel do bagaço de kiwi processada por pulverização ultrafina em almôndegas de porco como um substituto de gordura. Os resultados do estudo detectaram que a propriedade de hidratação, as capacidades de retenção de água, óleo e gordura aumentaram em 51,61%, 40,21%, 46,09% e 47,01%, respectivamente. Os autores concluíram que a adição do subproduto contribuiu para melhorias nas propriedades físico-químicas e funcionais das almôndegas. Além disso, os resultados da avaliação sensorial indicaram que as almôndegas com baixo teor de gordura e enriquecidas com 3% do subproduto de bagaço de kiwi em pó contribuíram para uma aceitabilidade satisfatória.

Em outros estudos, há interesse na busca de melhoria do perfil nutricional do produto final sem provocar efeitos negativos nas características sensoriais.

Das *et al.* (2021) apresentaram diversos benefícios para a utilização de subprodutos de romã em novos produtos, como aumentar a quantidade de fibras, promover atividade antibacteriana e antifúngica, o que melhora a vida útil dos produtos. Já Tuffi *et al.* (2021) avaliaram a adição de farinha resíduo de uvas (cascas, caules e sementes) Bordeaux e Trebbiano nas características físico-químicas e sensoriais de almôndega bovina. Os autores concluíram que a farinha foi capaz de reduzir a oxidação lipídica em comparação às amostras controle. Além disso, promoveu diferenças nos parâmetros de aparência e sabor. Todavia, essas modificações não desagradaram ao consumidor.

Santos *et al.* (2021) avaliaram os efeitos da adição de diferentes concentrações de farinha de albedo de maracujá (FAM) nas qualidades físico-químicas e tecnológicas de produtos do tipo *spam* formulados com carne de tilápia separada mecanicamente. No estudo foram utilizados cinco níveis de FAM (0%; 2,5%; 5%; 7,5% e 10%). O aumento da FAM diminuiu o teor de proteína, o valor do pH, a perda de peso durante o cozimento, a luminosidade, as exsudações de gordura e água. A formulação mais aceita continha 2,5% FAM,

que apresentou alto valor nutricional (10,4% de proteína e 1,78% de fibra alimentar total).

Velasco-Arango *et al.* (2021) investigaram a influência da adição de extrato de epicarpo de goiaba, nas concentrações 25, 50 e 75%, em substituição ao nitrito nas propriedades físico-químicas, na textura, na cor e nos atributos sensoriais de salsichas. Os autores observaram que não houve diferenças significativas nas características químicas dos diferentes embutidos elaborados em comparação ao controle. Os valores de elasticidade e gomosidade apresentaram diferenças estatísticas, enquanto não foi observado impacto na textura das salsichas. Em relação à análise sensorial, a textura, o sabor, o cheiro e a aceitação melhoraram com a adição das três frações de extrato de epicarpo de goiaba, enquanto a pontuação para textura permaneceu semelhante à da salsicha controle. A formulação com a maior aceitação foi a salsicha com 25% de extrato, havendo uma menor aceitação para as demais formulações com maior proporção do ingrediente.

Marconato *et al.* (2020) avaliaram a adição de farinha de casca de batata-doce sobre as características físico-químicas, tecnológicas e sensoriais de hambúrguer bovino. Assim, formulações de hambúrguer adicionadas de farinha foram preparadas nas seguintes proporções 0, 0,75, 1,5 e 2,25%. A farinha produzida apresentou altos teores de minerais, carboidrato e fibra alimentar. Os autores identificaram que a adição de farinha de casca de batata-doce promoveu aumento na retenção de umidade e no encolhimento, redução na retenção de gordura e rendimento da cocção. Em relação à análise sensorial, todas as formulações elaboradas apresentaram índice de aceitabilidade superior a 70%, sendo que o hambúrguer com adição de até 1,5% de farinha teve aceitação similar à amostra-controle.

Corimayhua-Silva *et al.* (2024) avaliaram a influência da adição de cascas de pitaiá vermelha em pó em salsichas emulsionadas à base de alpaca como substitutos parciais da gordura de porco. A aplicação deste subproduto rico em pectina de baixo teor de metoxil em salsichas emulsionadas permitiu uma redução de gordura de porco

de 15,0% para 5,14% na nova formulação desenvolvida. As salsichas emulsionadas à base de alpaca com adição de 9,86% de cascas de pitaia em pó apresentaram pontuações sensoriais significativamente mais altas em termos de sabor (5,89), textura (6,12) e aceitabilidade geral (6,27) do que a salsicha controle. Os autores destacaram que se trata de um subproduto promissor para uso como substituto de gordura para o desenvolvimento de produtos cárneos mais saudáveis.

Produtos lácteos

O desenvolvimento de novos produtos com adição de ingredientes não convencionais torna-se uma oportunidade para a elaboração de novos alimentos mais saudáveis, e para a redução do desperdício de alimentos e descarte no ambiente. O mercado de produtos lácteos com alegação de propriedades funcionais aumentou ao longo dos últimos anos devido ao crescimento da demanda do consumidor por alimentos que proporcionam benefícios à saúde (COSTA *et al.*, 2017).

Nwaoha e colaboradores (2012) desenvolveram um iogurte aromatizado com suco de beterraba em diferentes níveis de concentrações, onde observaram aumento nos níveis de micronutrientes (Mg, Na, Ca e vitamina C).

Souza (2016) desenvolveu iogurte adicionado de polpa de abóbora amarela e foram elaboradas quatro formulações de iogurte de diferentes concentrações (0%, 5%, 10% e 15%) com resultados que mostraram que a adição da polpa elevou o valor nutricional, principalmente de carotenoides. As análises microbiológicas indicaram boas condições higiênicossanitárias das formulações elaboradas. A avaliação sensorial demonstrou que o nível de aceitação ficou entre a nota 6 (gostei ligeiramente) e 7 (gostei moderadamente), necessitando de ajuste nas formulações para uma melhor resposta sensorial.

Oliveira (2017) caracterizou a composição físico-química de iogurte adicionado de xarope de polpa e de resíduos de beterraba

e verificou que as formulações se mantiveram estáveis durante os 28 dias de armazenamento. Assim, sendo uma opção para o mercado consumidor, pois não houve a adição de conservantes sintéticos, mas ainda mantiveram suas características físico-químicas dentro do padrão de qualidade de leites fermentados.

Ayar *et al.* (2017) investigaram os efeitos da adição de subprodutos ricos em fibras alimentares a sorvetes probióticos. Na pesquisa foram utilizados subprodutos à base de frutas (uva, damasco, maçã) e grãos (arroz, milho, girassol, cevada). A adição de subprodutos ricos em fibras alimentares ao sorvete resultou em sorvetes com propriedades físico-químicas e sensoriais comparáveis aos sorvetes de controle. A adição de fibras alimentares à base de frutas aumentou as taxas de sobrevivência de *L. acidophilus* durante os 60 dias de armazenamento, com valores acima de 6,0 log UFC/g.

Nascimento *et al.* (2017) desenvolveram sorvete de uva enriquecido com farinha de resíduo de uva agroindustrial (FR) nas proporções de 2%, 6% e 10%. O sorvete FR 2% apresentou atributos sensoriais satisfatórios que permitiram que fosse indicado como a melhor formulação. A adição de 2% de FRG ao sorvete de uva proporcionou aumento de proteína, lipídios, cinzas, fibra alimentar, valor energético total, açúcares redutores, fenólicos totais, flavonoides, flavonóis e antocianinas. Consequentemente, a capacidade antioxidante também foi maior do que a amostra padrão (sem FR). Os autores concluíram que a adição de FR 2% ao sorvete pode ser considerada uma aplicação tecnológica viável e saudável.

Azevedo (2019), em seu estudo, utilizou resíduo de polpa de manga para a elaboração de três formulações de iogurte, com concentrações de farinha de resíduo de manga em 0%, 5% e 10%. A formulação com maior índice de aceitabilidade foi a concentração de 5% que apresentou valor superior a 80% e mostrou-se uma alternativa para inserção no mercado e viável para agregar valor nutricional ao iogurte e, para auxiliar na redução do desperdício dos componentes desse resíduo alimentar no meio ambiente.

Hurtado-Romero *et al.* (2025) desenvolveram e caracterizaram lanches lácteos congelados fermentados com probióticos e contendo 2% de bagaço de mirtilo. Alto teor de proteína e aumento de fibra alimentar foram observados em formulações contendo o bagaço da fruta. Os autores ainda observaram características tecnológicas estáveis e a análise sensorial indicou altas pontuações de aceitação.

Segurança e qualidade dos subprodutos

No Brasil, os subprodutos vegetais são regulamentados por normas que visam garantir a segurança alimentar, o controle de contaminantes e a realização de testes de qualidade físico-química e microbiológica. Seu reaproveitamento na indústria exige um controle rigoroso do processamento e armazenamento para assegurar a manutenção do valor nutricional e a segurança para o consumo humano.

A classificação de produtos vegetais, seus subprodutos e resíduos de valor econômico é regulamentada pela Lei nº 9.972/2000, que estabelece critérios para a padronização e fiscalização desses produtos (BRASIL, 2000). Essa legislação foi complementada pelo Decreto nº 6.268/2007 (BRASIL, 2007), que detalha os procedimentos de inspeção e certificação de qualidade, e pelo Decreto nº 11.130/2022 (BRASIL, 2022a), que atualizou diretrizes para o controle e a rastreabilidade na cadeia produtiva. De acordo com o parágrafo único do Capítulo II do Decreto nº 6.268/2007, um subproduto vegetal só pode ser destinado à alimentação humana se não representar risco à saúde pública (BRASIL, 2007). Dessa forma, o cumprimento das normas de segurança estabelecidas pela legislação vigente torna-se indispensável para garantir sua adequação ao consumo.

A classificação fiscalizadora dos subprodutos e resíduos de valor econômico é um processo obrigatório quando esses produtos são destinados para o consumo humano (BRASIL, 2000). Esse procedimento consiste na determinação das qualidades intrínsecas e extrínsecas de

um produto vegetal com base em padrões oficiais, físicos ou descritos, a fim de aferir sua conformidade (BRASIL, 2000; BRASIL, 2007). A elaboração desses padrões, bem como a organização normativa, supervisão técnica e fiscalização do procedimento de classificação, é de responsabilidade do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2007).

No mesmo contexto de garantia da segurança e qualidade dos produtos vegetais, a Instrução Normativa GM/MAPA nº 23/2020 estabelece os requisitos gerais de higiene e boas práticas de fabricação para produtos vegetais, subprodutos e resíduos de valor econômico (BRASIL, 2020). Esse regulamento técnico busca assegurar a qualidade e segurança desses produtos ao longo de toda a cadeia produtiva, desde o beneficiamento até o armazenamento e transporte (BRASIL, 2020). Além disso, esta normativa reforça a necessidade de um controle rigoroso contra contaminações físicas, químicas e biológicas, garantindo que os produtos cheguem ao consumidor final em conformidade com os padrões de qualidade e segurança alimentar (BRASIL, 2020).

Por fim, além das atribuições mencionadas, o MAPA, por meio da Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA), abriga o Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Vegetal (Dipov), responsável por coordenar as ações do Programa Nacional de Controle de Resíduos e Contaminantes em Produtos de Origem Vegetal (PNCRC/Vegetal). Instituído pela Portaria SDA nº 574, de 9 de maio de 2022, o esse Programa reúne um conjunto de ações voltadas ao controle oficial de resíduos de agrotóxicos e contaminantes químicos, físicos e biológicos em produtos de origem vegetal destinados ao mercado nacional, importados e exportados, cujo objetivo é monitorar a qualidade e segurança desses produtos (BRASIL, 2022b).

Conforme a portaria vigente, a relação dos resíduos e contaminantes incluídos no escopo do PNCRC/Vegetal para cada produto de origem vegetal é estabelecida com base na legislação específica, nos métodos analíticos disponíveis e em novas demandas. Os métodos de

análise utilizados devem atender aos critérios de desempenho e adequação ao propósito, conforme requisitos estabelecidos pela Coordenação-Geral de Laboratórios Agropecuários (BRASIL, 2022b).

O rigor técnico e normativo estabelecido pela regulamentação visa garantir que os produtos de origem vegetal, incluindo seus subprodutos, cheguem ao consumidor com qualidade e segurança, refletindo a importância de um sistema de fiscalização eficiente. Sobretudo, tal característica reforça a confiança na cadeia produtiva e no controle sanitário dentro do território nacional, que preza sempre pela oferta de alimentos seguros para o consumo da população.

Aspectos econômicos e sustentabilidade

O consumo de frutas e hortaliças aumentou nos últimos anos devido aos seus benefícios à saúde, incluindo a prevenção de doenças cardiovasculares, proveniente da presença de vitaminas, antioxidantes, compostos fenólicos e carotenoides. Como resultado, a agroindústria de frutas e hortaliças passou por uma grande expansão, com destaque para as indústrias de sucos, drinques e polpas, que utilizam 47% dessa produção e desempenhando um papel significativo na economia do país (BRANCO *et al.*, 2007; ABPM, 2019).

A produção de hortaliças é ampla e diversificada, com cascas e bagaços frequentemente descartados ou reaproveitados como adubo. No entanto uma pequena porcentagem desses subprodutos ainda é descartada devido aos custos operacionais que geram para as indústrias (SETTE *et al.*, 2020).

Com essa expansão, a produção de subprodutos surge como um grande desafio, devido aos elevados volumes gerados sem descarte adequado (FERREIRA *et al.*, 2017; COMUNIAN *et al.*, 2021). Esse problema é considerado uma questão global urgente, refletindo no uso ineficiente dos recursos naturais (COMUNIAN *et al.*, 2021).

Esse fato está associado ao modelo adotado de desenvolvimento e pela falta de planejamento industrial que, quando mal administrados, podem causar impactos ambientais e econômicos significativos. O desenvolvimento de infraestruturas e serviços adequados não acompanhou a elevada expansão das cidades e das áreas de plantio. Como isso, a gestão dos resíduos sólidos tornou-se uma questão tanto para o setor privado quanto para a administração pública, demandando das entidades reguladoras, legislativas e governamentais a criação de regulamentações específicas e a fiscalização de sua aplicação (JACINTO *et al.*, 2021; ABPM, 2019).

De acordo com a FAO (2022), o reaproveitamento de alimentos e produtos agrícolas disponíveis requer suporte político. Há evidências que o reaproveitamento integral dos alimentos pode desempenhar um papel fundamental na redução dos custos das dietas, contribuindo para o aumento do poder de compra da população.

O reaproveitamento de resíduos e subprodutos na forma de cascas, polpas, talos e sementes gerados durante o processamento de frutas, verduras e vegetais ricos em fibras e compostos bioativos, permite a preservação de nutrientes essenciais e oferece uma fonte econômica de compostos de alto valor para os setores alimentícios (SANTOS *et al.*, 2018; COMUNIAN *et al.*, 2021; GUIMARÃES *et al.*, 2023; DOMÍNGUEZ *et al.*, 2020).

O Brasil, por sua vez, possui uma vasta extensão de terras férteis e condições climáticas favoráveis, destacando-se como o terceiro maior produtor de hortifrutícolas do mundo, com uma produção superior a 40 milhões de toneladas por ano (ANUÁRIO, 2024). No entanto, também está entre os países que mais desperdiçam alimentos ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a colheita até o processamento. Diante desse cenário, a valorização de subprodutos agroindustriais surge como uma alternativa sustentável, permitindo a conservação dos recursos naturais e a transformação de resíduos antes considerados um problema ambiental em insumos de alto valor agregado (FERREIRA, 2017; RATU *et al.*, 2023).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), na resolução 001 de 1986, define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades, químicas, físicas e biológicas do meio ambiente, provocada por substâncias ou formas de energia geradas por atividades humanas (BRASIL, 1986). Assim, o desperdício, o descarte incorreto de alimentos e a geração de subprodutos acarretam impactos ambientais significativos.

O desperdício de alimentos abrange aqueles descartados por diferentes setores, sendo o familiar responsável por 61%, os serviços de alimentação por 26% e o varejo 13% desse desperdício. Sendo assim, aproximadamente 10% das emissões globais de gases de efeito estufa são provenientes da produção de alimentos que acabam sendo desperdiçados (PNUMA, 2021).

Tanto o agronegócio quanto as atividades industriais geram quantidades expressivas de resíduos prejudiciais ao meio ambiente (LEANDRO-SILVA *et al.*, 2020). A decomposição desses resíduos resulta na liberação de odores desagradáveis por meio da putrefação, além da formação de chorume, que pode contaminar lençóis freáticos e rios (LUIZ *et al.*, 2019).

Assim, a conservação dos recursos naturais é fundamental para garantir a qualidade de vida no planeta, assegurando a redução do desperdício e dos danos ambientais, além de incentivar a adoção de novas práticas. Essas medidas contribuem para mudanças no comportamento humano, visando minimizar o desperdício de resíduos nos processos produtivos e fortalecer o equilíbrio ecológico sustentável (LEANDRO-SILVA *et al.*, 2020; LUIZ *et al.*, 2019). Deste modo, o redirecionamento de subprodutos para novas linhas de processamento é uma alternativa viável para reduzir possíveis impactos ambientais.

Desafios e Perspectivas Futuras

Na sociedade atual, têm surgido novas abordagens para o aproveitamento sustentável de subprodutos provenientes de produtos hortofrutícolas. Um dos principais desafios para a viabilidade econômica desses processos está na disponibilidade de subprodutos em quantidades adequadas, que frequentemente variam devido à sazonalidade. Entretanto, essa variação não deve ser vista apenas como obstáculo, mas como oportunidade para que as indústrias busquem parcerias ou desenvolvam soluções integradas, combinando subprodutos de diferentes empresas que possuam composições semelhantes ou complementares (VALENTE, 2015).

As limitações impostas pela legislação também devem ser levadas em conta, especialmente no que diz respeito à incorporação de novos ingredientes funcionais. É essencial que esses produtos atendam aos requisitos regulatórios para assegurar sua aprovação no mercado e garantir o retorno esperado (VALENTE, 2015). No entanto, esta transição só será possível se políticas adequadas estiverem em vigor em uma estrutura que estimule a inovação e o desenvolvimento tecnológico (DE JESUS *et al.*, 2018). Além disso, é fundamental superar barreiras relacionadas a aspectos culturais, mercadológicos, à falta de gestão estratégica, bem como à escassez de recursos financeiros e de mão de obra qualificada (GHISELLINI *et al.*, 2016; DE JESUS *et al.*, 2018; MILLETTE *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019; ORMAZABAL *et al.*, 2018).

Nesse cenário, surge a economia circular (EC), um conceito que propõe uma nova abordagem na relação entre sociedade e natureza, buscando evitar o esgotamento de recursos, promover a reutilização da energia e dos materiais e contribuir para o desenvolvimento sustentável (PRIETO-SANDOVAL *et al.*, 2019). Baseada na preservação do capital natural, na otimização do uso de recursos e na eficiência sistêmica (WITHIN, 2015). Esse modelo econômico é baseado em estratégias que substituem o descarte ao final do ciclo

de vida dos produtos, priorizando práticas como redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais nos processos produtivos (KIRCHHERR *et al.*, 2017).

No entanto, as tendências futuras indicam um crescimento na incorporação de resíduos agrícolas na formulação de novos recursos, além dos alimentares. Estudos recentes demonstram que a transformação de subprodutos gerados a partir de cascas, polpas, talos e sementes de frutas, verduras e vegetais é uma alternativa viável para o enriquecimento e reaproveitamento de diversos produtos (DOMÍNGUEZ *et al.*, 2020, CISTINA *et al.*, 2022). Além disso, a valorização de resíduos também tem impacto na produção de ração animal, visto que subprodutos agrícolas podem ser aproveitados diretamente para nutrição animal devido ao seu valor nutricional (SAN MARTIN *et al.*, 2016).

Considerações finais

A valorização dos subprodutos é uma tendência crescente na indústria alimentícia, pois impulsiona a inovação e a redução do desperdício, tornando-se uma abordagem promissora para a sustentabilidade. Além disso, os subprodutos gerados apresentam fibras, vitaminas, minerais e compostos bioativos, que podem ser transformados e agregar valor nutricional às preparações.

Sementes e bagaços podem ser utilizados para extração de óleos e compostos bioativos. Além disso, cascas de frutas e hortaliças podem ser utilizadas para a extração de fibras e compostos antioxidantes, que podem ser convertidos em farinhas e aditivos alimentares. Isso possibilita avanços tecnológicos na indústria de alimentos, com desenvolvimento de produtos com características nutricionais e sensoriais aprimoradas, além de atender diferentes segmentos de mercado.

Todavia, o aproveitamento integral dos alimentos apresenta alguns desafios como tecnologias apropriadas, garantia de segurança

e qualidade dos produtos obtidos a partir de subprodutos e aceitação por parte dos consumidores. Assim, a utilização de subprodutos envolve aspectos complexos, todavia caracteriza-se como uma oportunidade para inovação e implementação de estratégias que promovam a sustentabilidade.

Referências

- ABPM – Associação Brasileira dos Produtores de Maçã. **Anuários da Maçã**. 2019. Disponível em: <http://www.abpm.org.br/anuarios-da-maca>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- AIOLFI, A. H.; BASSO, C. Preparações elaboradas com aproveitamento integral dos alimentos. **Disciplinarum Scientia | Saúde**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 109-114, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumS/article/view/1037>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- ALBIZZATI, P. F.; TONINI, D.; ASTRUP, T. F. High-value products from food waste: an environmental and socio-economic assessment. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 755, p. 142466, 2021.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DO HORTI & FRUTI 2024. **Anuário Brasileiro do Horti & Fruti 2024**. [S. l.]: Editora Gazeta, 2024. Disponível em: <https://editoragazeta.com.br/produto/anuario-brasileiro-do-horti-fruti-2024/>. Acesso em: 16 fev. 2025.
- AZEVEDO, O. O. C. **Aproveitamento integral de resíduos da polpa de manga na elaboração e avaliação sensorial do iogurte**. 2019. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Nutrição) – Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, 2019.
- BENVENUTTI, L.; ZIELINSKI, A. A. F.; FERREIRA, S. R. S. Jaboticaba (*Myrtaceae* cauliflora) fruit and its by-products: alternative

- sources for new foods and functional components. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 112, p. 118-136, 2021.
- BERENGUER, C. V. *et al.* Current challenges in the sustainable valorisation of agri-food wastes: a review. **Processes**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 20, 2022.
- BERENGUER, C. V. *et al.* Management of Agri-Food Waste Based on Thermochemical Processes towards a Circular Bioeconomy Concept: the case study of the Portuguese industry. **Processes**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 2870, 2023.
- BRANCO, I. G. *et al.* Avaliação sensorial e estabilidade físico-química de um blend de laranja e cenoura. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 27, p. 7-12, 2007.
- BRASIL. Decreto nº 6.268, de 22 de novembro de 2007. Regulamenta a classificação de produtos vegetais, subprodutos e resíduos de valor econômico, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 23 nov. 2007.
- BRASIL. Decreto nº 11.130, de 19 de julho de 2022. Altera o Decreto nº 6.268, de 22 de novembro de 2007, que regulamenta a classificação de produtos vegetais, subprodutos e resíduos de valor econômico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 20 jul. 2022.
- BRASIL. Lei nº 9.972, de 25 de maio de 2000. Dispõe sobre a classificação de produtos vegetais, subprodutos e resíduos de valor econômico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 26 maio 2000.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 23, de 25 de março de 2020. Estabelece os requisitos gerais de higiene e boas práticas de fabricação para produtos vegetais, subprodutos e resíduos de valor econômico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 1 abr. 2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Portaria SDA nº 574, de 9 de maio de 2022. Institui o Programa Nacional de Controle de Resíduos e

- Contaminantes em Produtos de Origem Vegetal (PNCRC/Vegetal). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 87, p. 6, 10 maio 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- BRASIL. Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- BRITO, T. B. N. *et al.* Chemical composition and physicochemical characterization for cabbage and pineapple by-products flour valorization. **LWT**, [s. l.], v. 124, p. 109028, 2020.
- BRITO, T. B. *et al.* Fruit and vegetable residues flours with different granulometry range as raw material for pectin-enriched biodegradable film preparation. **Food Research International**, [s. l.], v. 121, p. 412-421, 2019.
- BUENO, P. H. T. **Panorama geral das perdas e desperdício de alimentos e soluções para o acesso à alimentação**. 2019. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2019.
- ÇAĞINDI, Ö.; AKCA, E. E.; KÖSE, E. Melon seed: a nutritionally valuable by-product and its effects on cake quality. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 427, p. 136679, 2023.
- CALICETI, C. *et al.* Agri-food waste from apple, pear, and sugar beet as a source of protective bioactive molecules for endothelial dysfunction and its major complications. **Antioxidants**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1786, 2022.
- CARDOSO, F. T. *et al.* Aproveitamento integral de alimentos e o seu impacto na saúde. **Sustainability in Debate**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 131-143, 2015.
- CASSANI, L.; GOMEZ-ZAVAGLIA, A. Sustainable food systems in fruits and vegetables food supply chains. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 9, p. 17, 2022.

- CICCORITTI, R. *et al.* Phytochemical and functional properties of fruit and vegetable processing by-products. **Applied Sciences**, [s. l], v. 14, n. 20, p. 9172, 2024.
- COMUNIAN, T. A.; SILVA, M. P.; SOUZA, C. J. F. The use of food by-products as a novel for functional foods: their use as ingredients and for the encapsulation process. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l], v. 108, p. 269-280, 2021.
- CONCEIÇÃO, A. C. *et al.* Elaboração e análise físico-química e sensorial de um pão fortificado com a farinha do resíduo pedúnculo do caju (*Anacardium Occidentale* L.). **Ensaio e Ciência**, [s. l], v. 26, n. 2, p. 229-236, 2022.
- CORIMAYHUA-SILVA, A. A. *et al.* Red dragon fruit peels: effect of two species ratio and particle size on fibre quality and its application in reduced-fat alpaca-based sausages. **Foods**, [s. l], v. 13, n. 3, p. 386, 2024.
- COSTA, M. P. *et al.* Consumer perception, health information, and instrumental parameters of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) goat milk yogurts. **Journal of Dairy Science**, [s. l], v. 100, n. 1, p. 157-168, 2017.
- CRISTINA, I.; RAFAEL. Aproveitamento de subprodutos do processamento de frutas e hortaliças. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, [s. l], v. 12, n. 1, p. 9-16, 2022.
- DA SILVA BARROS, L. *et al.* Utilização de farinha de resíduo de abacaxi aromatizada na produção de cookies. **Brazilian Journal of Development**, [s. l], v. 5, n. 10, p. 21926-21937, 2019.
- DA SILVA, R. R. *et al.* Resíduos de frutas e vegetais: uma revisão sobre o potencial de extração de pigmentos e aplicação em produtos da indústria de alimentos. In: **Estudos em ciências agrárias no Brasil: produções multidisciplinares do século XXI**. [S. l]: [s. n.], 2023. p. 314-327.
- DASSOFF, E. S. *et al.* Potential development of non-synthetic food additives from orange processing by-products—a review. **Food Quality and Safety**, [s. l], v. 5, p. fyaa035, 2021.

- DE BRITO NOGUEIRA, T. B. *et al.* Fruits and vegetable-processing waste: a case study in two markets at Rio de Janeiro, RJ, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 27, n. 15, p. 18530-18540, 2020.
- DE JESUS, A.; MENDONÇA, S. Lost in transition? Drivers and barriers in the eco innovation road to the circular economy. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 145, p. 75-89, 2018.
- DO NASCIMENTO FILHO, W. B.; FRANCO, C. R. Avaliação do potencial dos resíduos produzidos através do processamento agroindustrial no Brasil. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 1968-1987, 2015.
- DOMÍNGUEZ, R. *et al.* Red beetroot: a potential source of natural additives for the meat industry. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 23, p. 8340, 2020.
- DOS SANTOS, P. C. M. *et al.* Garlic (*Allium sativum* L.) peel extracts: from industrial by-product to food additive. **Applied Food Research**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 100186, 2022.
- DOS SANTOS, E. A. *et al.* Exploitation of byproducts from the passion fruit juice and tilapia filleting industries to obtain a functional meat product. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 41, p. 101084, 2021.
- DOS SANTOS, G. J. *et al.* Valorization of wastes from the juice passion fruit production industry: extraction of bioactive compounds from seeds, antioxidant, photoprotective and antiproliferative activities. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1233-1250, 2023.
- FAIOM, A.; SAVOLDI, A. L. L.; MATTIELLO, E. R. Elaboração de barra de cereal a partir de farinha de ora-pro-nóbis e resíduo agroindustrial de abacaxi. **Tecnologia & Competitividade Industrial**, [s. l.], v. 14, p. 139-154, 2021.
- FAO. **Moving forward on food loss and waste reduction**. 2019.
- FAO. **Save food**: global initiative on food loss and waste reduction. Key facts on food loss and waste you should know. 2015.

- FERNANDO, G. S. n. *et al.* Application of an ultrasound-assisted extraction method to recover betalains and polyphenols from red beetroot waste. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 26, p. 8736-8747, 2021.
- FERREIRA, L. A. A utilização de resíduos das agroindústrias de suco de abacaxi para a produção de bromelina. **Revista Sítio Novo**, [s. l.], v. 1, p. 247-257, 2017.
- FIERASCU, R. C. *et al.* Fruits by-products—a source of valuable active principles: a short review. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [s. l.], v. 8, p. 319, 2020.
- FRANKLYN DA CRUZ, L. I. M. A. *et al.* An overview of applications in pineapple agroindustrial residues. **Acta Agriculturae Slovenica**, [s. l.], v. 111, n. 2, p. 445-462, 2018.
- GANESH, K. S.; SRIDHAR, A.; VISHALI, S. Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: conventional utilization and emerging opportunities-a review. **Chemosphere**, [s. l.], v. 287, p. 132221, 2022.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 114, p. 11-32, 2016.
- GLIŠIĆ, M. *et al.* Agricultural waste: a source of bioactive compounds for potential application in meat products. **Meat Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 116-121, 2023.
- GRASSO, S. *et al.* The utilisation of agricultural by-products in processed meat products: effects on physicochemical, nutritional and sensory quality – invited review. **Meat Science**, [s. l.], p. 109451, 2024.
- GUIMARÃES, M. L. L. *et al.* Potencial de aproveitamento dos coprodutos de frutas tropicais na elaboração de novos produtos alimentícios. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. e14312240012, 2023.

- HERRERO, M. Towards green extraction of bioactive natural compounds. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, [s. l.], v. 416, p. 2039-2047, 2024.
- HURTADO-ROMERO, A. *et al.* Frozen fermented dairy snacks with probiotics and blueberry bagasse: stability, bioactivity, and digestive viability. **Microorganisms**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 86, 2025.
- JACINTO, C. A.; ABREU, L. M. de; RIBEIRO, E. N. Gerenciamento de resíduos sólidos do complexo militar forte Santa Bárbara-Formosa-GO. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 83-98, 2021.
- JIMENEZ-CHAMPI, D. *et al.* Bioactive compounds in potato peels, extraction methods, and their applications in the food industry: a review. **Cyta-Journal of Food**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 418-432, 2023.
- JOSE, M. *et al.* Valorization of food industry by-product (Pineapple Pomace): a study to evaluate its effect on physicochemical and textural properties of developed cookies. **Measurement: Food**, [s. l.], v. 6, p. 100031, 2022.
- KASPRZAK, M.; RZEDZICKI, Z. Effect of pea seed coat admixture on physical properties and chemical composition of bread. **International Agrophysics**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 149-156, 2010.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 127, p. 221-232, 2017.
- KULTYS, E.; KUREK, M. A. Green extraction of carotenoids from fruit and vegetable byproducts: a review. **Molecules**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 518, 2022.
- LAU, K. Q.; SABRAN, M. R.; SHAFIE, S. R. Utilization of vegetable and fruit by-products as functional ingredient and food. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 8, p. 661693, 2021.
- LEANDRO-SILVA, E. *et al.* Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, p. e-12656, 2020.

- LI, Q. *et al.* Orange pomace and peel extraction processes towards sustainable utilization: a short review. **Molecules**, [s. l.], v. 28, n. 8, p. 3550, 2023.
- LIMA, S. K. R. *et al.* Valorization of fruit co-product flours for human nutrition: challenges, applications, and perspectives. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 18, p. 13665, 2023.
- LUCA, M. I.; UNGUREANU-IUGA, M.; MIRONEASA, S. Carrot pomace characterization for application in cereal-based products. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 16, p. 7989, 2022.
- LUIZ, A. A. O.; SANTOS, M. B.; AZEREDO, E. M. Elaboração e análise sensorial de preparações a partir do aproveitamento integral de alimentos. **Revista da Associação Brasileira de Nutrição – RASBRAN**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 52-58, 2019.
- MACAGNAN, F. T. *et al.* Caracterização nutricional e resposta sensorial de pães de mel com alto teor de fibra alimentar elaborados com farinhas de subprodutos do processamento de frutas. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 201-210, 2014.
- MARCONATO, A. M. *et al.* Sweet potato peel flour in hamburger: effect on physicochemical, technological and sensorial characteristics. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 23, 2020.
- MILLETTE, S.; HULL, C. E.; WILLIAMS, E. Business incubators as effective tools for driving circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 266, p. 121999, 2020.
- MOHLAMONYANE, M. J.; ADEYEMI, J. O.; FAWOLE, O. A. Pomegranate fruit peel: a sustainable bioresource in food preservation. **Food Bioscience**, [s. l.], p. 105532, 2024.
- MUNTEAN, M. V. *et al.* A sustainable approach for the development of innovative products from fruit and vegetable by-products. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 17, p. 10862, 2022.
- NASCIMENTO, E. A.; MELO, E. A.; LIMA, V. L. A. G. Ice cream with functional potential added grape agro-industrial waste.

- Journal of Culinary Science & Technology**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 128-148, 2017.
- NÚÑEZ-GÓMEZ, V.; GONZÁLEZ-BARRIO, R.; PERIAGO, M. J. Interaction between dietary fibre and bioactive compounds in plant by-products: impact on bioaccessibility and bioavailability. **Antioxidants**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 976, 2023.
- NWAOHA, M.; ELIZABETH, I.; ONYINYECHI, N. G. Production and evaluation of yoghurt flavoured with beetroot (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Food Science and Engineering**, [s. l.], v. 2, p. 583-592, 2012.
- OLIVEIRA, M. C. F.; PANDOLFI, M. A. C. Estudo bibliográfico: aproveitamento integral na elaboração de subprodutos na indústria alimentícia. **Revista Interface Tecnológica**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 797-806, 2020.
- OLIVEIRA, L. C. P. **Utilização de polpa e resíduos de beterraba para aproveitamento tecnológico na formulação de iogurte concentrado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2017.
- OLIVER-SIMANCAS, R. *et al.* Comprehensive research on mango by-products applications in food industry. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 118, p. 179-188, 2021.
- ORMAZABAL, M. *et al.* Circular economy in Spanish SMEs: challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 185, p. 157-167, 2018.
- PALOMO, I. *et al.* Chemical characterization and antiplatelet potential of bioactive extract from tomato pomace (byproduct of tomato paste). **Nutrients**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 456, 2019.
- PARAFATI, L. *et al.* Pomegranate byproduct extracts as ingredients for producing experimental cheese with enhanced microbiological, functional, and physical characteristics. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 2669, 2021.

- PEREZ, C. *et al.* Blueberry by-product used as an ingredient in the development of functional cookies. **Food Science and Technology International**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 301-308, 2018.
- PHILIPPI, S. T. **Pirâmide dos alimentos: fundamentos básicos da nutrição**. 3. ed. Barueri: Manole, 2018. E-book. 403 p. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788520462423/>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- PRIETO-SANDOVAL, V. *et al.* Key strategies, resources, and capabilities for implementing circular economy in industrial small and medium enterprises. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 1473-1484, 2019.
- PROETTO, I. *et al.* Use of vegetable flours obtained from artichoke by-products as a functional ingredient in gluten-free bread formulations. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 38, p. 101015, 2024.
- PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Reduzir o desperdício de alimentos é uma das maneiras mais fáceis de diminuir o impacto climático pessoal**. 2021.
- RAMOS, M.; JIMÉNEZ, A.; GARRIGÓS, M. C. Il-based advanced techniques for the extraction of value-added compounds from natural sources and food by-products. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 119, p. 115616, 2019.
- RATU, R. N. *et al.* Application of Agri-food by-products in the food industry. **Agriculture**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 1559, 2023.
- ROMERO-MARTÍNEZ, M.; ANDRADE-PIZARRO, R.; DE PAULA, C. Functional compounds in tropical fruit processing by-products and intrinsic factors affecting their composition: a review. **Current Research in Food Science**, [s. l.], v. 10, p. 101028, 2025.
- SAADOUN, J. H. *et al.* Fermentation of agri-food waste: a promising route for the production of aroma compounds. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 707, 2021.

- SALANȚĂ, L. C.; FĂRCAȘ, A. C. Exploring the efficacy and feasibility of tomato by-products in advancing food industry applications. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 62, p. 105567, 2024.
- SAN MARTIN, D.; RAMOS, S.; ZUFÍA, J. Valorisation of food waste to produce new raw materials for animal feed. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 198, p. 68-74, 2016.
- SANTOS, J. *et al.* Aspectos de qualidade de hambúrgueres de frango com substituição parcial de gordura por farelo do resíduo de cajá (*Spondias mombin* L.). **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 53-57, 2018.
- SEIBEL, N. F.; RODRIGUES, D. D. Aproveitamento de resíduos agroindustriais de origem vegetal para alimentação humana. *In*: **Ciência e Tecnologia de Alimentos: pesquisa e práticas contemporâneas**. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2021. p. 90-105.
- ŠEREMET, D. *et al.* Red beetroot and banana peels as value-added ingredients: assessment of biological activity and preparation of functional edible films. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 21, p. 4724, 2022.
- SETTE, P. *et al.* Integral valorization of fruit waste from wine and cider industries. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 242, p. 118486, 2020.
- SILVA, N. da; TANIWAKI, M. H.; SÁ, P. B. Z. R. de. **Fermentação e processos fermentativos**. [S. l.]: TikiBooks, 2022.
- SKWAREK, P.; KARWOWSKA, M. Fruit and vegetable processing by-products as functional meat product ingredients—a chance to improve the nutritional value. **LWT**, [s. l.], p. 115442, 2023.
- SORRENTI, V. *et al.* Recent advances in health benefits of bioactive compounds from food wastes and by-products: biochemical aspects. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 2019, 2023.
- SOUSA, L. B. **Iogurte adicionado de polpa de abóbora amarela (*Cucurbita moschata* Duchesne)**. 2016. Monografia

- (Graduação em Tecnologia em Alimentos) – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2016.
- SOUZA, R. **Alimentos enriquecidos: o que são?**. 2025. Disponível em: <https://gepea.com.br/alimentos-enriquecidos/>. Acesso em: 16 fev. 2025.
- TAPIA-RODRIGUEZ, M. R. *et al.* By-products from minimal processing of fresh fruits and vegetables. In: **Plant Food By-Products**. [s. l.]: Apple Academic Press, 2018. p. 183-200.
- TEIXEIRA, F. *et al.* Cookies adicionados de farinha da casca de beterraba: análise físico-química e sensorial entre crianças. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 472-488, 2017.
- TESHOME, E. *et al.* Fruit by-products and their industrial applications for nutritional benefits and health promotion: a comprehensive review. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 10, p. 7840, 2023.
- TUFFI, L. C. *et al.* Grape residue flour as an antioxidant and fiber source in beef meatballs. **British Food Journal**, [s. l.], v. 123, n. 8, p. 2831-2843, 2021.
- UEDA, J. M. *et al.* Food additives from fruit and vegetable by-products and bio-residues: a comprehensive review focused on sustainability. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 5212, 2022.
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Alimentos funcionais. **Jornal Eletrônico**, n. 5, jun. 2008.
- URRUTIA, M. D. *et al.* Formulação de bolos enriquecidos com farinhas produzidas com subprodutos da laranja. **FAG Journal of Health**, [s. l.], 2019.
- VALENTE, J. M. L. D. **Subprodutos alimentares: novas alternativas e possíveis aplicações farmacêuticas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2015.
- VAN DER GOOT, A. J. *et al.* Concepts for further sustainable production of foods. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 168, p. 42-51, 2016.

- VARZAKAS, T.; ZAKYNTHINOS, G.; VERPOORT, F. Plant food residues as a source of nutraceuticals and functional foods. **Foods**, [s. l], v. 5, n. 4, p. 88, 2016.
- VELASCO-ARANGO, V. A.; HLEAP-ZAPATA, J. I.; ORDÓÑEZ-SANTOS, L. E. Effect of adding guava (*Psidium guajava*) epicarp extract flour on the physicochemical, textural, colour and sensory properties of frankfurters. **Food Technology and Biotechnology**, [s. l], v. 59, n. 2, p. 194-200, 2021.
- VELDERRAIN-RODRÍGUEZ, G. R. *et al.* Phenolic-rich extracts from avocado fruit residues as functional food ingredients with antioxidant and antiproliferative properties. **Biomolecules**, [s. l], v. 11, n. 7, p. 977, 2021.
- WANG, C. *et al.* The high-value and sustainable utilization of grape pomace: a review. **Food Chemistry: X**, [s. l], p. 101845, 2024.
- WITHIN, G. – Ellen MacArthur Foundation. **A circular economy vision for a competitive Europe**. [S. l]: Ellen MacArthur Foundation, 2015. 98 p.
- XIN, T. *et al.* Impact of replacing wheat flour with lychee juice by-products on bread quality characteristics and microstructure. **LWT**, [s. l], v. 165, p. 113696, 2022.
- ZHANG, A. *et al.* Barriers to smart waste management for a circular economy in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l], v. 240, p. 118198, 2019.
- ZHAO, D. *et al.* Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l], v. 58, n. 4, p. 1524-1537, 2020.

Plantas alimentícias não convencionais: propriedades nutricionais, funcionais, tecnológicas e possíveis aplicações em novos produtos alimentícios

*Daniel Sgrancio Uliana • Rhaiza Marcia Passos Leal •
Kananda Galvão Batestin Messias • Jackline Freitas Brilhante de São José*

O atual cenário alimentar é caracterizado por uma crescente demanda por alimentos mais sustentáveis, que causem menores impactos ambientais (MILIÃO *et al.*, 2022; MIRANDA *et al.*, 2024). Nesse sentido, as Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) são exemplos de alimentos que favorecem uma alimentação mais saudável e sustentável, pois elas são mais resistentes a pragas, doenças, mudanças climáticas, estresse hídrico, além de contribuírem com a sociobiodiversidade local (CECATTO *et al.*, 2023; CORADO; LIMA; FONTENELLE, 2022; DURIGON; MADEIRA; KINUPP, 2023).

As PANC são definidas como espécies nativas ou exóticas, cultivadas e naturalizadas no território, que possuem uma ou mais partes comestíveis e que não são de uso corriqueiro para a maioria da população (DURIGON; MADEIRA; FERREIRA KINUPP, 2023; KINUPP; LORENZI, 2014). São importantes aliadas à promoção da segurança alimentar e nutricional (SAN) e do direito humano à alimentação adequada e saudável, devido ao seu baixo custo e facilidade de produção. Portanto, podem ser uma alternativa econômica e saudável para a população mundial em crescimento (CORADO; LIMA; FONTENELLE, 2022; FERREIRA *et al.*, 2024). Ademais, o consumo das PANC contribuem com a recuperação dos saberes e culturas tradicionais e com o resgate da valorização culinária regional, promovendo uma dieta mais diversificada e mais nutritiva (CECATTO *et al.*, 2023; CORADO; LIMA; FONTENELLE, 2022).

Estima-se que existem cerca de 30 mil espécies de plantas potencialmente comestíveis (FERREIRA *et al.*, 2024). Entretanto, a expansão das grandes corporações, das grandes redes de supermercados e a influência midiática tem contribuído com a construção de um sistema alimentar hegemônico, com supervalorização das monoculturas de cadeias produtivas estruturadas. Dessa forma, as plantas nativas foram perdendo seu espaço bem como saberes tradicionais e culturais, formas de manejo, cultivo e conservação, tendo sua preservação restrita às comunidades rurais (DURIGON; MADEIRA; KINUPP, 2023; FERREIRA *et al.*, 2024).

Dessa forma, a redução da quantidade de espécies utilizadas na alimentação tem contribuído para um cenário de monotonia alimentar (DURIGON; MADEIRA; KINUPP, 2023). Nesse contexto, torna-se relevante promover um debate em relação à inclusão de novas espécies na alimentação, como as PANC. Segundo Kinupp e Lorenzi (2014), as PANC são promissoras na tecnologia de alimentos para atender a demanda do mercado por alimentos mais sustentáveis. Assim, a riqueza de nutrientes e de compostos bioativos possibilita a exploração das PANC no desenvolvimento de novos produtos

alimentícios mais nutritivos e com possível potencial funcional. Além disso, contribuem com a sociobiodiversidade local, sustentabilidade, com a cultura alimentar e com a geração de renda e empregos (CECATTO *et al.*, 2023; MILIÃO *et al.*, 2022; MIRANDA *et al.*, 2024).

Este capítulo tem como objetivo explorar as propriedades nutricionais e funcionais das PANC, destacando seus benefícios para a saúde e seu potencial na alimentação. Serão discutidos ainda seus usos tradicionais, aspectos tecnológicos relacionados ao processamento, conservação e inovações culinárias. Também serão abordadas as iniciativas para promover o consumo e aumentar a aceitação das PANC, bem como o impacto econômico dessas plantas, seu papel na sustentabilidade e sua contribuição para a segurança alimentar e nutricional.

Propriedades Nutricionais e Funcionais das Plantas Alimentícias Não Convencionais

Ainda são escassos estudos mais aprofundados acerca das propriedades funcionais e nutricionais das PANC, bem como de digestibilidade e biodisponibilidade dos nutrientes e fitoquímicos presentes nelas (FERREIRA *et al.*, 2024). Entretanto, é sabido que são importantes fontes de nutrientes, como vitaminas, minerais, fibras e gorduras saudáveis, além de serem ricas em compostos bioativos que conferem a elas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e outras ações terapêuticas (CECATTO *et al.*, 2023).

Com o aumento da conscientização acerca de uma alimentação mais saudável e sustentável, bem como preceitos étnicos, culturais, morais e religiosos, novas tendências de consumo alimentar têm ganhado evidência. Estilos de vida minimalistas, agroecológicos e *plant-based*, como indivíduos flexitarianos, vegetarianos e veganos, aliados à preocupação com os impactos ambientais relacionados ao cultivo de proteínas animais, tem trazido destaque para as fontes alternativas emergentes de proteínas (LIRA *et al.*, 2023; MILIÃO

et al., 2022). Entre elas, as proteínas advindas de vegetais não convencionais, como as PANC.

As fontes vegetais de proteínas possuem baixo custo de produção e já vêm sendo bastante exploradas pela indústria alimentícia. Os cereais, pseudocereais e leguminosas são os mais estudados como substitutos para as proteínas animais (Pastrana-Pastrana *et al.*, 2025). Entretanto, as proteínas de PANC ainda são pouco exploradas. Espécies como *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas* L., *Cannabis sativa* L., *Pereskia aculeata* Miller, *Beta vulgaris* L., *Bambusa vulgaris* e *Gramineae bambusoideae* são ricas em proteínas distribuídas em diferentes partes dessas plantas, como folhas, caules e sementes, possuindo grande potencial para serem fontes alternativas desse nutriente (MILIÃO *et al.*, 2022).

A ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*) é uma das PANC mais conhecidas, principalmente devido ao seu alto teor de proteína (MILIÃO *et al.*, 2022). As folhas da ora-pro-nóbis podem possuir de 25 a 28% de proteínas em sua base seca, demonstrando ter quantidades superiores a outros vegetais convencionais, como o feijão vermelho, a aveia e o arroz (LIRA *et al.*, 2023; TORRES *et al.*, 2022). Além disso, as proteínas presentes na ora-pro-nóbis são de alta digestibilidade e qualidade, formadas por aminoácidos essenciais, como triptofano, leucina, lisina, fenilalanina e tirosina (LIRA *et al.*, 2023; MILIÃO *et al.*, 2022). Outra planta com composição nutricional relevante é o jambu (*Acmella oleracea*). Trata-se de uma planta muito utilizada em pratos típicos do Norte do país e também vem sendo explorada como alimento fonte de proteína alternativa (MIRANDA *et al.*, 2024).

Além dos benefícios à saúde relacionados ao consumo de proteínas, como a preservação da massa magra e do sistema imunológico (WHITTAKER, 2023), as proteínas também possuem propriedades tecnológicas para o processamento de alimentos. Elas auxiliam no aumento da capacidade de absorção de água e/ou capacidade de absorção de óleo, melhorando as propriedades tecnológicas e nutricionais dos alimentos (MILIÃO *et al.*, 2022). Assim, as PANC podem

representar uma alternativa em potencial de fornecimento de proteínas de alto valor biológico, com menor pegada ecológica para o meio ambiente e aplicação na elaboração de novos produtos.

As PANC também são reconhecidas pelo seu alto teor de fibras (MILIÃO *et al.*, 2022). As fibras são carboidratos complexos que podem ser divididos em duas categorias: fibras solúveis e fibras insolúveis em água (CHEN *et al.*, 2024; MOURA *et al.*, 2021). Elas exercem diversas propriedades fisiológicas e funcionais no organismo humano, como modulação do metabolismo, controle do colesterol e da glicemia sanguínea, além de contribuírem com a motilidade intestinal, modulação da microbiota, aumento da saciedade e controle do peso (CHEN *et al.*, 2024). O amaranto (*Amaranthus caudatus*, *Amaranthus cruentus* e *Amaranthus hypochondriacus*) e o sorgo (*Sorghum bicolor*) são fortes exemplos de PANC com alto teor de fibras (MILIÃO *et al.*, 2022). Além destas, se destacam hortaliças folhosas como o peixinho-da-horta (*Stachys byzantina*), o jambu (*Acmella oleracea*), o dente-de-leão (*Taraxacum officinale*) e a taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) (DE ALMEIDA *et al.*, 2022; FERREIRA *et al.*, 2024; MILIÃO *et al.*, 2022; MIRANDA *et al.*, 2024). Os caules, como o broto de bambu (*Bambusa vulgaris* e *Gramineae bambusoideae*), também são promissores em relação ao seu teor de fibras, que é de aproximadamente 40% na matéria seca e pode ser utilizada para a fortificação de alimentos. Também já foram relatadas na literatura que a fibra do broto de bambu melhora as propriedades sensoriais, reológicas e tecnológicas dos alimentos, além de contribuir para a redução da absorção de gordura em alimentos fritos (MILIÃO *et al.*, 2022).

A riqueza de vitaminas e minerais é outra característica importante das PANC (CAVALCANTE *et al.*, 2023). As folhas de taioba podem ser consideradas fontes de cálcio, magnésio, fósforo, ferro e zinco, além de vitaminas B2, B6 e C (FERREIRA *et al.*, 2024; MIRANDA *et al.*, 2024). A ora-pro-nóbis é fonte de ferro, manganês, zinco e cálcio e vitaminas A, C, E e ácido fólico (FERREIRA *et al.*, 2024; LIRA *et al.*, 2023). O dente-de-leão possui minerais como ferro,

manganês, selênio, cobre, molibdênio e zinco (DE ALMEIDA *et al.*, 2022). Assim, essas PANC demonstram potencial para serem utilizadas pela indústria alimentícia (FERREIRA *et al.*, 2024).

As frutas e hortaliças são as principais fontes de compostos bioativos (BEZERRA; BRITO, 2020). Assim, as PANC também possuem estas características sendo ricas em compostos bioativos, como compostos fenólicos e carotenoides (MILIÃO *et al.*, 2022). Os compostos bioativos são definidos como metabólitos secundários das plantas que causam efeitos biológicos à saúde de humanos e animais, que podem ser utilizados para produção de alimentos com alegação de propriedade funcional. Esses compostos estão relacionados a diversos benefícios à saúde, como eliminação de radicais livres e espécies reativas de oxigênio, bem como aumento da expressão de enzimas antioxidantes, atuando como antioxidantes. Além de apresentarem função anti-inflamatória, neuroprotetora, de transdução de sinal e expressão gênica, levando a indução de apoptose e necrose (ABBASZADEH *et al.*, 2025; BEZERRA; BRITO, 2020; DIAS *et al.*, 2022; MILIÃO *et al.*, 2022; VIEIRA DA SILVA; BARREIRA; OLIVEIRA, 2016).

Os compostos fenólicos, presentes nas PANC, atuam como rompedores das reações de peroxidação lipídica e quelantes de metais, como o ferro, inibem enzimas oxidantes, como a xantina oxidase, modulam processos de sinalização celular, interferindo nas vias de proteínas e lipídios quinases, permitindo a restauração de um pool antioxidante interno (SORRENTI *et al.*, 2023). Entre os principais compostos desta categoria, se destacam os ácidos fenólicos, flavonoides e taninos. Tais compostos vêm sendo amplamente estudados pela indústria alimentícia devido ao seu potencial antioxidante e corante, como substituto para aditivos sintéticos (MURKOVIC, 2016).

Os carotenoides, por sua vez, são pigmentos naturais lipossolúveis que conferem coloração amarelo-avermelhada a flores, frutas e vegetais. Estes pigmentos apresentam atividade antioxidantes e estão relacionados à diminuição do risco de desenvolvimento de doenças crônicas (MILIÃO *et al.*, 2022; ASHOKKUMAR *et al.*, 2023). Entre

os carotenoides existentes, o α -caroteno, β -criptoxantina e β -caroteno, destacam-se como precursores da vitamina A (SUN *et al.*, 2022; BANWO *et al.*, 2021). Devido às suas características de cor, os carotenoides são amplamente empregados na indústria de alimentos como corantes naturais (ASHOKKUMAR *et al.*, 2023).

As folhas de ora-pro-nóbis, por exemplo, apresentam alta capacidade antioxidante e teor de compostos fenólicos, como ácidos fenólicos e flavonoides, além de carotenoides também. O ácido caftarico representa cerca de 50% dos compostos fenólicos dessa PANC. Mais de 20 compostos fenólicos já foram identificados nas folhas de ora-pro-nóbis e extratos dessa planta têm sido relacionados a atividades antioxidante, anticancerígena, antimicrobiana, anti-inflamatória, antinociceptiva, analgésica e antiproliferativa contra leucemia e neuroblastoma. As folhas de taioba também possuem elevada atividade antioxidante e teor de compostos fenólicos. Também é rica em polifenóis, flavonóides, taninos e ácidos fenólicos, que contribuem para suas propriedades antioxidantes (Ferreira *et al.*, 2024).

Uma revisão recente demonstrou o potencial do uso de PANC dos gêneros *Murraya* spp., *Piper* spp. e *Ocimum* spp., que possuem compostos como linalol, limoneno, acetato de geranila, acetato de linalila e eugenol, para produção de óleos essenciais como conservantes naturais de alimentos. O estudo demonstrou que esses óleos possuem atividades antimicrobianas e antioxidantes comprovadas, podendo ser utilizados como alternativas para conservantes sintéticos (CAVALCANTE *et al.*, 2023).

Diversas hortaliças não convencionais, como beldroega (*Portulaca oleracea*), bertalha (*Basella rubra*), caruru (*Amaranthus viridis*), peixinho (*Stachis lanata*) e azedinha (*Rumex acetosa*) possuem em sua composição, fitoquímicos com potencial antioxidante. A presença desses compostos em alimentos podem ser responsáveis por conferir alegação de propriedade funcional a novos produtos, se a segurança de seu consumo for comprovada, atendendo aos requisitos da

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (BEZERRA; BRITO, 2020; BRASIL, 2018).

Dessa forma, as PANC possuem diversos nutrientes e compostos bioativos com diversas propriedades tecnológicas que podem ser aproveitadas pela indústria alimentícia para a elaboração de novos alimentos com alto valor nutricional, alegação de propriedade funcional e ainda, contribuir com a cultura do país e/ou região e com a sustentabilidade.

Aspectos Tecnológicos das Plantas Alimentícias Não Convencionais

O cenário inovador da indústria de alimentos que compreende empresas agroalimentares e *startups* estão aplicando tecnologias, inovação e ciência no setor de alimentos para que se possa, futuramente, produzir alimentos com eficiência, sustentabilidade e saudabilidade no design, produção, seleção, entrega, uso de embalagens e aditivos (MIRANDA *et al.*, 2024). Assim, estudos têm sido realizados com o objetivo de propor o processamento de folhas, cascas, grãos, cascas ou caules de hortaliças não convencionais (MILIÃO *et al.*, 2022).

O desenvolvimento de farinhas obtidos por secagem podem contribuir para a comercialização das PANC em diferentes regiões do país, e podem ser utilizadas em diversas formulações alimentícias, para melhorar a composição nutricional, principalmente em teor de proteínas, fibras e compostos bioativos (BEZERRA; BRITO, 2020; MILIÃO *et al.*, 2022). Na maioria das vezes, as farinhas obtidas a partir de plantas não convencionais apresentam teor de fibras e proteínas maiores que as farinhas tradicionais. Essas farinhas podem ser utilizadas como substituição total ou parcial das farinhas tradicionais em preparações alimentícias como estratégia para aumentar o consumo de substâncias essenciais à dieta, como compostos bioativos e micronutrientes (MILIÃO *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2023).

Além de se destacar pelo seu alto teor de proteínas, a ora-pro-nóbis também é conhecida por ter um alto teor de mucilagem de sabor neutro (FERREIRA *et al.*, 2024; TORRES *et al.*, 2022). A mucilagem é um polissacarídeo complexo, de estrutura longa, flexível e linear que possui alta capacidade de absorção de água e formação de um gel viscoso, mesmo em baixas temperaturas, podendo ser utilizado como emulsificante, gelificante e espessante. A mucilagem da ora-pro-nóbis possui alta quantidade de proteínas, o que melhora a capacidade emulsificante e a viscosidade, além de melhorar o perfil nutricional do alimento (LIRA *et al.*, 2023).

O amido possui propriedades tecnológicas importantes no desenvolvimento de novos alimentos, para formação de textura, espessamento e aumento da concentração de sólidos suspensos, além de ser estabilizante em emulsões ácidas. A araruta (*Maranta arundinaceae* L.), considerada PANC em algumas regiões, é rica em amido de alta digestibilidade, representando uma excelente fonte de amido sem glúten, podendo ser interessante substituta às farinhas tradicionais, como a de trigo e para o desenvolvimento de alimentos para celíacos (SOUZA *et al.*, 2023).

Outrossim, vale destacar que o apelo de trazer PANC na composição de alimento pode ser uma excelente forma de diversificação de produtos e competitividade de marcas, trazendo características sensoriais como cores e sabores diversificados (MILIÃO *et al.*, 2022).

Aplicações Culinárias e Inovação na Alimentação

De acordo com Kinupp e Lorenzi (2014), as PANCs têm potencial para utilização na área da tecnologia de alimentos para a elaboração de novos produtos, com possibilidade de contribuir para o atendimento de uma demanda de mercado por alimentos com alegação de propriedades funcionais. Deste modo, diversas PANC apresentam potencial para diversificar e melhorar a qualidade alimentar.

As PANC possuem um elevado potencial para uso na alimentação, podendo suas partes, como folhas, frutos, flores, sementes, vagens, raízes, ramos, brotos serem consumidas *in natura* ou em preparações, como sucos, refogados, saladas, doces, geleias, sorvetes, bolos (BEZERRA; BRITO, 2020).

Na culinária tradicional, na maioria das vezes, as PANC são consumidas cruas em saladas, sucos, ou refogadas em sopas ou para agregar alguma receita, como ensopados, omeletes, massas, entre outros. No Quadro 1 são apresentadas algumas PANC e suas aplicações na culinária tradicional. A Figura 1 apresenta algumas imagens dessas plantas.

Quadro 1: Plantas Alimentícias Não Convencionais e seus nomes populares, científicos, aspectos nutricionais, partes comestíveis e formas de consumo

PANC	Aspectos nutricionais	Partes comestíveis	Formas de consumo	Referência
Almeirão-roxo (<i>Lactuca canadensis</i>)	Rica em potássio e cálcio, sendo boa fonte de proteína e fibras, em base seca	Folhas	Refogadas ou cozidas, preparadas com feijão e arroz ou como recheio de bolinhos. Podem ser consumidas cruas	Embrapa, 2017
Araçá-pêra (<i>Psidium acutangulum</i>)	Rica em vitamina C, fibras e compostos fenólicos	Polpa	Devido à alta taxa de acidez, é usualmente utilizado em vitaminas, sucos, geleias, compotas, mousses, sorvete, creme, picolés, licores e sobremesas em geral	KINUPP; LORENZI, 2014; ANDRADE <i>et al.</i> , 1993
Araruta (<i>Maranta arundinacea</i>)	Rica em potássio e magnésio, vitamina A, C e ferro	Raízes (rizoma)	A farinha pode ser utilizada para elaborar produtos de panificação, como espessante e como substituto do amido de milho em diversas receitas	SOUZA <i>et al.</i> , 2023
Azedinha (<i>Rumex acetosa</i>)	Rica em minerais, como potássio, magnésio e ferro, além de apresentar potencial antioxidante	Folhas	Consumidas cruas em saladas e sucos ou cozidas em sopas e molhos	Embrapa, 2017

continua

PANC	Aspectos nutricionais	Partes comestíveis	Formas de consumo	Referência
Beldroega (<i>Portulaca oleracea</i>)	Rica em vitamina C, além de possuir altos teores de magnésio e zinco	Folhas e sementes	As folhas podem ser consumidas cruas, em sopas, tortas salgadas e bolinhos. Suas sementes podem ser utilizadas em pães	Embrapa, 2017
Bertalha (<i>Anredera cordifolia</i>)	Boa fonte de fibra, vitamina A, vitamina C, cálcio e ferro	Folhas e talos	Consumida crua, refogada ou no preparo de pratos com carnes e ovos; pode ser usada em farofas, tortas e quiches. Seus talos grossos podem ser refogados e adicionados ao arroz e ao feijão	Embrapa, 2017
Biribiri* (<i>Averrhoa bilimbi</i>)	Apresenta ácido málico (e possivelmente ácido oxálico), vitamina C, além de atividade antioxidante.	Frutos e flores	Os frutos são muito ácidos e podem ser utilizados para pickles (sem vinagre), doces em calda, cristalizados, doces de corte ('marmelada'), <i>curries</i> , <i>chutneys</i> , geléias e 'limonadas'; suas flores podem ser usadas em conservas, saladas e decoração comestível	KINUPP; LORENZI, 2014
Bougainvillea (<i>Bougainvillea glabra Choisy</i>)	Atividade antioxidante, anti-inflamatória, além de possuir flavonoides, taninos, betalaínas e terpenóides.	Brácteas	Podem ser consumidas cruas ou cozidas, frescas ou desidratadas; adicionadas a sucos ou refrescos, pratos doces ou salgados; sob a forma de geleias ou chás; podem ser utilizadas como corante natural em preparações, adicionadas a massas e receitas	RODRÍGUEZ-HERRER <i>et al</i> , 2023; RANIERI, 2021; SALEEM <i>et al</i> , 2021

continua

PANC	Aspectos nutricionais	Partes comestíveis	Formas de consumo	Referência
Capuchinha (<i>Tropaeolum majus</i>)	Rica em vitamina C, antocianina, carotenoides e flavonoides	Flores, folhas e sementes	Saladas, patês, pães, em sopas, refogados; suas flores podem ser utilizadas para decorar pratos ou desidratadas, embebidas em álcool ou calda de açúcar e adicionadas a coquetéis; as sementes são usadas sob a forma de conserva, conhecidas como falsas alcaparras	Kinupp; Lorenzi, 2014; Embrapa, 2017
Fisalis (<i>Physalis peruviana</i>)	Fonte de fibra alimentar e quantidades notáveis de ácido ascórbico, tocoferóis, potássio, fósforo e magnésio, compostos bioativos	Fruto	Os frutos são consumidos <i>in natura</i> ou como geleias, sendo muito usados para decorar tortas e doces finos	Añibarro-Ortega <i>et al</i> , 2025; Embrapa, 2017
Ora-pro-nóbis (<i>Pereskia aculeata</i>)	Rica em proteínas, vitaminas A, B e C, minerais como potássio, magnésio, zinco, cálcio e ferro, além de fibras e mucilagens	Folhas, frutos e flores	Podem ser consumidos crus; pode ser cozido com diferentes tipos de carnes ou utilizado como ingrediente no preparo de pães, tortas e bolos	Embrapa, 2017

continua

PANC	Aspectos nutricionais	Partes comestíveis	Formas de consumo	Referência
Peixinho da horta (<i>Stachys byzantina</i> K. Koch)	Possui teores significativos de minerais (cálcio e ferro), sendo excelente fonte de fibra alimentar	Folhas	Consumido preferencialmente empanado; devido à presença de um relativo teor de óleo, a folha possui um sabor que remete ao do peixe.	Embrapa, 2017
Serralha (<i>Sonchus oleraceus</i>)	Apresenta consideráveis teores de proteínas, carotenóides, fibras e minerais (potássio, fósforo, magnésio, ferro e zinco)	Folhas, talos e flores jovens	Apresenta sabor amargo característico é consumida refogada, em omeletes e em massas ou como salada	Embrapa, 2017
Taioba (<i>Xanthosoma sagittifolium</i>)	Rica em proteína, minerais (potássio, cálcio, fósforo, ferro e zinco) e vitaminas	Rizomas, talo e folhas	As folhas são usualmente consumidas como a couve, refogadas ou cozidas, e como acompanhamento de pratos à base de carnes ou farinhas de milho ou de mandioca; os rizomas podem ser consumidos cozidos, fritos ou processados como farinha (fonte alternativa de carboidratos)	Embrapa, 2017

Fonte: Elaborado pelos autores. *Portadores de problemas renais devem consultar nutricionista e médico a respeito de seu consumo.

Figura 1: Fotografias de algumas Plantas Alimentícias Não Convencionais. a – Almeirão-roxo (*Lactuca canadensis*); b – Araçá-pêra (*Psidium acutangulum*); c – Azedinha (*Rumex acetosa*); d – *Bougainvillea* (*Bougainvillea* e – Capuchinha (*Tropaeolum majus*); f – Ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*); g – Peixinho da horta (*Stachys byzantina* K. Koch); h – Serralha (*Sonchus oleraceus*); i – Taioba (*Xanthosoma sagittifolium*)



Figura 1a



Figura 1b



Figura 1c

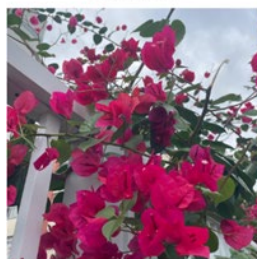


Figura 1d



Figura 1e



Figura 1f



Figura 1g



Figura 1h



Figura 1i

Fonte: Imagens do acervo pessoal dos autores.

Além da culinária tradicional, as PANC também possuem potencial para aplicação na indústria de alimentos para o desenvolvimento

dos mais diversos produtos alimentícios. Diversos pesquisadores elaboraram alimentos contendo PANC e avaliaram suas características nutricionais e sensoriais. Mendes *et al.* (2024) demonstraram que a adição de folhas de azedinha (*Rumex acetosa*) e taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) ao suco de laranja *in natura* resultou em melhorias no perfil nutricional, destacando-se no aumento do teor de fibras, cinzas e proteínas, além de proporcionar baixo valor energético. . As PANC também contribuíram para o aumento dos compostos fenólicos totais e da capacidade antioxidante do suco. O suco que continha apenas laranja e azedinha foi o mais bem aceito na análise sensorial.

Outros autores produziram uma bebida mista fermentada de major gomes (*Spondias mombin*) com cajá, que demonstrou ser uma alternativa saudável para elaboração de bebidas probióticas não lácteas (ALVES *et al.*, 2024). De forma similar, Oliveira Cruz *et al.* (2024) obtiveram um iogurte vegetal com sementes de Munguba (*Pachira aquatica*) com características compatíveis ao iogurte de leite de vaca, demonstrando manutenção da viabilidade probiótica e estabilidade microbiológica, obtendo uma produção bem-sucedida.

Outra bebida desenvolvida, foi o Kombucha de vinagreira (*Hibiscus sabdariffa* L.), em que os autores observaram que o uso dessa PANC no Kombucha revelou propriedades físico-químicas e microbiológicas promissoras, constituindo uma base sólida para o desenvolvimento do produto. Todas as formulações apresentaram propriedades antioxidantes e alto teor de compostos fenólicos, com uma taxa de aceitação de 68,6% pelos consumidores (MENDONÇA *et al.*, 2023).

O molho agri-doce de açaí com João-Gomes ou major gomes (*Talinum triangulare*) demonstrou características de identidade e qualidade semelhantes ao ketchup, com boa estabilidade microbiológica e boa aceitação sensorial (DA SILVA *et al.*, 2021). Além disso, panetones produzidos com amido de araruta (*Maranta arundinaceae* L.) por Souza *et al.* (2023) apresentaram qualidades nutricionais, tecnológicas e funcionais, superiores ao produto tradicional. Dessa forma,

demonstraram que o amido dessa PANC é uma boa opção de ingrediente alimentício.

Tais estudos revelaram que a adição de PANC em receitas convencionais, como sucos, molhos e pães são uma alternativa para o enriquecimento nutricional e funcional desses produtos, bem como melhoria da qualidade e sensorial. É importante destacar que a utilização de PANC em novos produtos alimentícios pode permitir dar uma nova forma de uso na alimentação e também possibilita agregar valor ao produto elaborado. Dessa forma, incluir PANC em preparações ou na elaboração de novos produtos alimentícios representa uma importante estratégia para promoção do consumo dessas plantas negligenciadas por grande parte da sociedade.

Fatores antinutricionais

Conforme já abordado ao longo deste capítulo, as PANC podem ser fonte de vitaminas, minerais e compostos bioativos, metabólitos secundários produzidos pelas plantas em resposta a estresses bióticos e abióticos (BORGES; AMORIM, 2020; PANG *et al.*, 2021; MILIÃO *et al.*, 2022). Esses compostos desempenham diversas atividades biológicas e funcionais, como atividade antioxidante, anti-inflamatória e estimulação do sistema imunológico, (BANWO *et al.*, 2021). Todavia, determinados metabólitos secundários podem apresentar compostos com características de toxinas naturais (PEREIRA; DE MEDEIROS; ARAÚJO, 2021).

Algumas classes de metabólitos secundários que podem atuar como toxinas naturais incluem alcalóides, glicosídeos cianogênicos, taninos e terpenos (PEREIRA; DE MEDEIROS; ARAÚJO, 2021). Essas toxinas, produzidas pelas plantas, desencadeiam reações adversas ao organismo humano e podem conter fatores antinutricionais, que comprometem a digestibilidade e biodisponibilidade de nutrientes, resultando em efeitos indesejáveis ou toxicidade, a depender da

quantidade ingerida (PEREIRA; DE MEDEIROS; ARAÚJO, 2021; SQUINELLO, 2022; FERREIRA *et al.*, 2024).

Contudo, os fatores antinutricionais presentes nas PANC podem ser reduzidos ou inativados através de técnicas apropriadas (SAMTYIA *et al.*, 2020). Algumas técnicas incluem cocção, branqueamento, descascamento, secagem, fermentação, branqueamento, moagem, maceração, entre outros (SQUINELLO 2022). A taioba, por exemplo, precisa passar por um processo de cocção antes do consumo, para eliminar oxalatos, fitatos, inibidores de proteinase, taninos e glicosídeos cianogênicos que são antinutrientes que podem exibir propriedades tóxicas (FERREIRA *et al.*, 2024). Assim, técnicas de preparo adequadas tornam-se necessárias para que a absorção de nutrientes e compostos bioativos presentes nessas plantas seja otimizada.

É importante mencionar que é preciso ter cuidados na identificação de uma PANC, porque algumas podem ter similares tóxicos. A taioba, por exemplo, possui uma espécie similar, popularmente conhecida como “taioba brava” (*Colocasia antiquorum* Schott), cujas folhas são tóxicas devido ao alto teor de oxalato que causa irritação na mucosa, queimaduras e inchaço na boca e na língua (FERREIRA *et al.*, 2024). Essas plantas podem se assemelhar em aparência ou características a outras que são venenosas e, se consumidas erroneamente, podem causar intoxicações. A identificação correta das PANC previne riscos à saúde, garantindo que os benefícios de seu consumo sejam aproveitados sem prejuízos. Desta forma, recomenda-se cautela ao utilizar uma planta desconhecida, e é indicado buscar auxílio na identificação da mesma antes de realizar o consumo.

Impacto Econômico, Sustentabilidade e Segurança Alimentar e Nutricional

As PANC apresentam potencial econômico de comercialização, uma vez que a maioria das plantas não requer manejo complexo,

representam baixo custo de produção e fácil acesso (FERREIRA *et al.*, 2024). Seu cultivo e comercialização viabiliza a diversificação alimentar, promove renda para os pequenos agricultores, impulsiona o fortalecimento da agricultura familiar e economia local, além de agregar valor, haja vista suas características nutricionais e sustentabilidade (JESUS *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2022; FERREIRA *et al.*, 2024).

As PANC podem auxiliar na redução do desperdício alimentar, pois proporcionam estratégias inovadoras e sustentáveis para a aquisição e consumo de alimentos, além da valorização da sociobiodiversidade (JESUS *et al.*, 2020; DURIGON; MADEIRA; KINUPP, 2023). Diversas PANC podem ser utilizadas de forma integral (flores, folhas, sementes, talos e cascas). Nesse sentido, a utilização total do tecido vegetal permite maximização dos recursos e redução dos subprodutos gerados.

Ademais, são plantas resistentes a pragas e adaptadas às mudanças climáticas diversas (OLIVEIRA; NAOZUKA, 2021). Essas características facilitam o cultivo e podem resultar na minimização de desperdício. Além disso, muitas PANC são originárias de determinadas regiões, o que favorece o acesso a alimentos acessíveis, frescos e nutritivos (SILVA *et al.*, 2022), evitando perdas e desperdícios associados à cadeia produtiva. Todos esses aspectos contribuem para a racionalização do consumo e valorização da agrobiodiversidade.

Apesar da grande diversidade de alimentos na cultura alimentar brasileira, a cadeia produtiva utiliza uma parcela muito pequena de espécies vegetais (CORADO, LIMA E FONTENELLE, 2022). Tal cenário, corrobora para a não efetivação de um direito conceituado nos Princípios e Diretrizes de uma Política de Segurança Alimentar e Nutricional (SAN), que é o acesso regular e permanente a alimentos de qualidade, em quantidade suficiente, sem comprometer o acesso a outras necessidades essenciais, tendo como base práticas alimentares promotoras de saúde, que respeitem a diversidade cultural e que sejam sociais, economicamente e ambientalmente sustentáveis (CONSEA, 2004). Refletindo-se, assim, na monotonia alimentar juntamente da

falta de alimentos essenciais às necessidades das populações carentes. À vista disso, a acessibilidade a tais alimentos, desigualdade estrutural, mudanças climáticas, renda, desemprego e outros fatores acabam contribuindo para a prevalência da insegurança alimentar de várias famílias (CORADO, LIMA E FONTENELLE, 2022).

Nesse contexto, as PANCs podem ser alternativas a uma alimentação mais acessível, visto que são facilmente encontradas em quintais, por exemplo. Com a exploração do potencial dessas espécies, as possibilidades de consumo são ampliadas, favorecendo aos cidadãos de baixa renda a produção de soberania alimentar e a mitigação da segurança alimentar e nutricional (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Ainda, destaca-se também como crucial para a manutenção de ecossistemas e cultivos sustentáveis, visto que, podem ser espécies que se adaptam às condições climáticas como: seca, umidade, erosão, entre outros (LIBERALESSO, 2019).

A inserção de PANC na alimentação e o incentivo ao consumo contribuem para a proteção dos sistemas alimentares e na diversificação da alimentação, pois estão presentes no território, são acessíveis e nutritivas. Além disso, o incentivo e o fortalecimento da produção local possibilitam o apoio à agricultura familiar e à geração de renda, bem como o respeito à identidade cultural das comunidades, contribuindo para uma agricultura mais sustentável, conservando a biodiversidade e o conhecimento tradicional. Tudo isso torna as PANC importantes aliadas à promoção da SAN (CUNHA, *et al.*, 2021; JACOB, 2020; TULER; PEIXOTO; SILVA, 2019).

Portanto com a utilização, cultivo e interesse crescentes das pessoas ao conhecimento das PANC, fomenta-se o apoio dessa tendência associada aos sistemas agroecológicos, sob o resguardo dos agricultores familiares, para ocorrer uma maior dinâmica das economias locais e diversidade de produção de alimentos. Dessa forma, a comercialização das plantas é fundamental para ampliar a renda dos agricultores, bem como conceder segurança e soberania alimentar para eles e para

os consumidores, valorizando a acessibilidade a uma dieta humana variada e rica nutricionalmente (FASOLO, ZONIN, DEBONI, 2024).

Por fim, o consumo deste grupo de alimentos se qualifica como uma oportunidade de estímulo aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), pois perpassa desde a melhoria na qualidade nutricional da alimentação brasileira até as iniciativas de consumo e produção responsáveis. Tais objetivos detêm o foco no desenvolvimento sustentável por meio de um plano de ação com aplicabilidade global, abrangendo inúmeros países (MECKELBURG, VIGODER, OLIVEIRA, 2022). Entre os ODS, o cultivo e o consumo das PANC, colaboram com a fome zero e agricultura sustentável (ODS 2), saúde e bem-estar (ODS 3), consumo e produção sustentável (ODS 12), ação contra a mudança global do clima (ODS 13) e vida terrestre (ODS 15) (DURIGON; MADEIRA; KINUPP, 2023; ONU, 2022). Também podem corroborar com a redução das desigualdades (ODS 10) e com o desenvolvimento das cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11) (ONU, 2022) com a implementação de hortas urbanas, que podem gerar renda para a população e contribuir com sistemas alimentares mais sustentáveis.

Promoção do Consumo e Aceitação das Plantas Alimentícias Não Convencionais

A escassa difusão de conhecimento sobre as PANC na sociedade contribui para a neofobia alimentar, causando resistência de consumir alimentos não convencionais. Isso acontece porque, muitas vezes, tais plantas são vistas como “matos” ou “ervas daninhas”, sendo associadas com risco de toxicidade (FERREIRA *et al.*, 2024; KINUPP; LORENZI, 2014).

Entretanto, propagar informações sobre aspectos nutricionais, forma de preparo e não toxicidade das PANC, bem como divulgação

de sobre aspectos sociais, sustentáveis, ecológicos e de saudabilidade podem ser utilizado como uma estratégia para reduzir a resistência de indivíduos em consumirem esses alimentos e aumentar a expectativa de provar algo que desconhecem (GOMES DE SOUZA *et al.*, 2023).

Um ponto importante em relação ao estímulo ao consumo das PANC é o esclarecimento em relação ao termo. BARBOSA *et al.* (2021) avaliaram se o uso do termo PANC pode influenciar na aceitação de produtos contendo essas plantas. Para conduzir o estudo, suco de jenipapo foi distribuído a consumidores em uma feira convencional e uma feira agroecológica sem mencionar nenhuma informação, enquanto para outros participantes, a presença do termo PANC e o conceito foram mencionados. Nesse contexto, os autores verificaram que o uso do termo PANC não afetou a avaliação sensorial. Por outro lado, conduzindo da mesma forma, mas ofertando bolos de taioba para outros avaliadores, o produto com o termo PANC mencionado foi menos aceito do que o produto sem a indicação apenas para os avaliadores que nunca tinham ouvido falar de PANC. Isso mostra que a falta de entendimento do termo pode levar à recusa de um novo produto com PANC, indicando que é muito importante a disseminação de informações sobre essas plantas para permitir a maior aceitação e consumo.

Existem diversas formas de promover o conhecimento sobre as PANC, como elaboração de materiais científicos e didáticos, como panfletos, folders e cartazes. A promoção de eventos voltados para a exposição das PANC e oficinas culinárias permitem uma aproximação direta da população com essas plantas, possibilitando a troca de diversos conhecimentos. Além disso, o uso de redes sociais, como o Instagram®, permite disseminar o conhecimento acerca de benefícios nutricionais, formas de cultivo e receitas com PANC para as mais diversas populações em diferentes regiões do país (ULIANA *et al.*, 2025 *in press*).

Outra maneira eficaz de disseminar o conhecimento sobre as PANC é por meio das hortas urbanas comunitárias. Esses espaços

não apenas fortalecem conexões entre as comunidades e os sistemas alimentares, mas também promovem a agroecologia, a agricultura sustentável e a valorização de plantas negligenciadas, como as PANC. Além disso, as hortas servem como ambientes de aprendizado, onde é possível compartilhar conhecimentos sobre o cultivo e o manejo adequado dessas plantas, desde o preparo do solo até a colheita (ULIANA *et al.*, 2023).

Dessa forma, propagar o conhecimento de diferentes formas sobre as potencialidades das PANC é uma estratégia eficaz para aproximar o consumidor dessas plantas que, muitas vezes, são desconhecidas para desconstruir a neofobia alimentar contra essas plantas e promover seu consumo.

Considerações finais

As Plantas Alimentícias Não Convencionais possuem as mais variadas propriedades nutricionais, desde a riqueza de proteínas, fibras, vitaminas e minerais, como a riqueza de compostos bioativos, que conferem diversos benefícios à saúde humana e propriedades tecnológicas para a produção de novos alimentos. Na culinária tradicional, as PANC são geralmente utilizadas cruas em saladas ou sucos ou cozidas em ensopados, preparações ou como ingredientes de receitas. Além disso, também possuem potencial aplicação na indústria alimentícia para elaboração dos mais diversos alimentos, como sucos e outras bebidas, produtos de panificação, molhos e até alimentos com alegação de propriedade funcional.

As PANC também contribuem para a sustentabilidade e com sete dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Agenda de 2030 da ONU. Ainda, estão correlacionadas com a segurança alimentar e nutricional, contribuindo com uma alimentação mais acessível e com a proteção dos sistemas alimentares. Entretanto, ainda é preciso difundir ainda mais o conhecimento acerca das propriedades

nutricionais, benefícios à saúde, econômicos, sociais e sustentáveis para aproximar a população dessas plantas e estimulá-los ao consumo.

Referências

- ABBASZADEH, F. *et al.* Phytochemicals from edible flowers prevent neurodegenerative diseases via the gut-brain axis. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 63, p. 105681, jan. 2025.
- ALMEIDA, L. C. de *et al.* Proximate composition and characterization of the vitamins and minerals of dandelion (*Taraxacum officinale*) from the Middle Doce River region – Minas Gerais, Brazil. *Heliyon*, [s. l.], v. 8, n. 12, p. e11949, dez. 2022.
- ALVES, D. M. D. M. *et al.* Innovative blends with probiotic potential: processing optimization, bioactive compounds and sensory evaluation of yellow mombin (*Spondias mombin*) and *Talinum triangulare* beverages. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 38, p. 101058, dez. 2024.
- ANDRADE, J. S.; ARAGÃO, C. G.; FERREIRA, S. A. do N. Caracterização física e química dos frutos de araçá-pera (*Psidium acutangulum* DC). **Acta Amazônica**, [s. l.], v. 23, p. 213-217, 1993.
- AÑIBARRO-ORTEGA, M. *et al.* Nutrients, phytochemicals, and in vitro biological activities of Goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and calyx. **Plants**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 327, 2025.
- ASHOKKUMAR, V. *et al.* Technological advances in the production of carotenoids and their applications—A critical review. **Biore-source Technology**, [s. l.], v. 367, p. 128215, 2023.
- BANWO, K. *et al.* Functional importance of bioactive compounds of foods with Potential Health Benefits: a review on recent trends. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 43, p. 101320, 2021.
- BARBOSA, D. M. *et al.* Does the label “unconventional food plant” influence food acceptance by potential consumers? A first approach. **Heliyon**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. e06731, 2021.

- BEZERRA, J. A.; BRITO, M. M. D. Potencial nutricional e antioxidantes das plantas alimentícias não convencionais (PANCs) e o uso na alimentação: revisão. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. e369997159, 22 ago. 2020.
- BORGES, L. P.; AMORIM, V. A. Metabólitos secundários de plantas. **Revista Agrotecnologia**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 54-67, 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Alimentos com alegações de propriedades funcionais e/ou de saúde, novos alimentos/ingredientes, substâncias bioativas e probióticos**: lista de alegações de propriedades funcionais aprovadas. Brasília, DF: Anvisa esclarece, 2018.
- CASEMIRO, Í. D. P.; VENDRAMINI, A. L. do A. Unconventional food plants in Brazil: what does Nutrition know about this topic?. **DEMETRA: Alimentação, Nutrição & Saúde**, [s. l.], v. 15, p. e42725, 30 mar. 2020.
- CAVALCANTE, D. N. *et al.* Essential oils from unconventional food plants (*Murraya* spp., *Ocimum* spp., *Piper* spp.) as alternative food flavorings. **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 3, p. 100481, dez. 2023.
- CECATTO, A. P. *et al.* Conhecimento e uso de plantas alimentícias não convencionais (PANCs). **Visão Acadêmica**, [s. l.], v. 24, n. 4, 29 dez. 2023.
- CHEN, H. *et al.* Study on the structure and adsorption characteristics of the complex of modified *Lentinus edodes* stalks dietary fiber and tea polyphenol. **Food Chemistry**, [s. l.], p. 142321, dez. 2024.
- CORADO, P. I. S. A.; LIMA, L. N. D. C.; FONTENELLE, L. C. O consumo de plantas alimentícias não convencionais para a promoção da segurança alimentar e nutricional e da cultura alimentar brasileira. **Segurança Alimentar e Nutricional**, [s. l.], v. 29, p. e022016, 10 nov. 2022.
- CRUZ, L. H. D. O. *et al.* Development of plant-based yogurt from munguba (*Pachira aquatica*) seeds: stability and predictive

- growth of lactic acid cultures. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 62, p. 105363, dez. 2024.
- DIAS, M. *et al.* Recent technological advances in phenolic compounds recovery and applications: source of nutraceuticals for the management of diabetes. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 18, p. 9271, 15 set. 2022.
- DURIGON, J.; MADEIRA, N. R.; KINUPP, V. F. Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC): da construção de um conceito à promoção de sistemas de produção mais diversificados e resilientes. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 268-291, 2023.
- Embrapa. Embrapa Hortaliças. **PANC – Hortaliças não convencionais**. 2017. Disponível em: <https://www.Embrapa.br/en/hortaliças/publicacoes/panc-hortaliças-nao-convencionais>. Acesso em: 13 fev. 2025.
- FASOLO, C.; ZONIN, V. J.; DEBONI, T. C. Comercialização de plantas alimentícias não convencionais (PANC) em feiras: reflexões sobre a agricultura familiar. **Revista Conexão UEPG**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 1-17, 2024.
- FERREIRA, C. P. *et al.* Nutritional composition, phenolic compounds and biological activities of selected unconventional food plants. **Food Research International**, [s. l.], p. 114643, jun. 2024.
- FERREIRA, R. D. S. *et al.* A neofobia alimentar pode afetar o consumo de alimentos acrescidos de plantas alimentícias não convencionais (PANC) por estudantes do ensino fundamental? **Revista Ponto de Vista**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1-14, 3 jul. 2024.
- JESUS, B. *et al.* PANCs-Plantas Alimentícias Não Convencionais, benefícios nutricionais, potencial econômico e resgate da cultura: uma revisão sistemática. **Enciclopédia Biosfera**, [s. l.], v. 17, n. 33, 2020.
- KINUPP, V. F.; LORENZI, H. **Plantas alimentícias não convencionais (PANC) no Brasil: guia de identificação, aspectos**

- nutricionais e receitas ilustradas. Nova Odessa: Instituto Plantarum de estudos da flora Ltda., 2014.
- LIRA, M. M. *et al.* Selected plants producing mucilage: overview, composition, and their potential as functional ingredients in the development of plant-based foods. **Food Research International**, [s. l.], v. 169, p. 112822, jul. 2023.
- MARIA, L. A. **O futuro da alimentação está nas plantas alimentícias não convencionais (PANC)?** Porto Alegre: UFRGS, 2019.
- MENDES, F. D. *et al.* Unconventional food plants in mixed juices: evaluation of the nutritional, physical-chemical, microbiological, and sensory quality of orange juice with sorrel (*Rumex acetosa*) and taioba (*Xanthosoma sagittifolium*). **CyTA – Journal of Food**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 2387716, 31 dez. 2024.
- MENDONÇA, G. R. *et al.* Kombucha based on unconventional parts of the *Hibiscus sabdariffa* L.: microbiological, physico-chemical, antioxidant activity, cytotoxicity and sensorial characteristics. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 34, p. 100804, dez. 2023.
- MILIÃO, G. L. *et al.* Unconventional food plants: nutritional aspects and perspectives for industrial applications. **Future Foods**, [s. l.], v. 5, p. 100124, jun. 2022.
- MIRANDA, C. T. C. D. S. *et al.* Unconventional edible plants of the Amazon: bioactive compounds, health benefits, challenges, and future trends. **Foods**, [s. l.], v. 13, n. 18, p. 2925, 15 set. 2024.
- MOURA, I. O. *et al.* Chemical characterization, antioxidant activity and cytotoxicity of the unconventional food plants: sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) leaf, major gomes (*Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn.) and caruru (*Amaranthus deflexus* L.). **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 2407-2431, maio 2021.
- MURKOVIC, M. Phenolic compounds: occurrence, classes, and analysis. *In: Encyclopedia of Food and Health*. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 346-351.

- OLIVEIRA, A. P.; NAOZUKA, J. Iron species and proteins distribution in unconventional food plants. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 24, p. e2020294, 2021.
- OLIVEIRA, J. G. *et al.* O papel das plantas alimentícias não convencionais na transição agroecológica e na promoção da segurança alimentar e nutricional. *In: Comprovações científicas e tecnológicas aplicadas na agricultura*. [S. l.]: [s. n.], 2024. p. 55-74.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- PANG, Z. *et al.* Linking plant secondary metabolites and plant microbiomes: a review. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 12, p. 621276, 2021.
- PASTRANA-PASTRANA, Á. J. *et al.* Plant proteins, insects, edible mushrooms and algae: more sustainable alternatives to conventional animal protein. **Journal of Future Foods**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 248-256, maio 2025.
- PEREIRA, F. O.; MEDEIROS, F. D. de; ARAÚJO, P. L. Natural toxins in Brazilian unconventional food plants uses and safety. *In: Local food plants of Brazil*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 89-114.
- RANIERI, G. **Matos de comer**: identificação de plantas comestíveis. 1. ed. São Paulo: [s. n.], 2021.
- RODRÍGUEZ-HERRERA, V. V.; GARCÍA-CRUZ, L.; VALLE-GUADARRAMA, S. Aqueous two-phase extraction: a non-thermal technique to separate and concentrate betalains from bougainvillea glabra choisy bracts. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 193, p. 116245, mar. 2023.
- SALEEM, H. *et al.* Bougainvillea glabra (choisy): a comprehensive review on botany, traditional uses, phytochemistry, pharmacology and toxicity. **Journal of Ethnopharmacology**, [s. l.], v. 266, p. 113356, fev. 2021.

- SAMTIYA, M.; ALUKO, R. E.; DHEWA, T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. **Food Production, Processing and Nutrition**, [s. l.], v. 2, p. 1-14, 2020.
- SILVA, B. V. da; BARREIRA, J. C. M.; OLIVEIRA, M. B. P. P. Natural phytochemicals and probiotics as bioactive ingredients for functional foods: extraction, biochemistry and protected-delivery technologies. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 50, p. 144-158, abr. 2016.
- SILVA, G. M. *et al.* O potencial das plantas alimentícias não convencionais (PANC): uma revisão de literatura. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 14838-14853, 2022.
- SILVA, M. M. da *et al.* Sweet-and-sour sauce of assai and unconventional food plants with functional properties: an innovation in fruit sauces. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 25, p. 100372, out. 2021.
- SOUZA, E. L. *et al.* Development and characterization of panettones enriched with bioactive compound powder produced from Shiraz grape by-product (*Vitis vinifera* L.) and arrowroot starch (*Maranta arundinaceae* L.). **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 2, p. 100220, out. 2023.
- SOUZA, P. G. de *et al.* Food neophobia, risk perception and attitudes associations of Brazilian consumers towards non-conventional edible plants and research on sale promotional strategies. **Food Research International**, [s. l.], v. 167, p. 112628, maio 2023.
- SQUINELLO, D. C. **Efeitos do tratamento térmico em fatores antinutricionais de plantas alimentícias não convencionais (PANC) da Região Amazônica**. 2022. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.
- TORRES, T. M. S. *et al.* High-pressure biorefining of ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata*). **The Journal of Supercritical Fluids**, [s. l.], v. 181, p. 105514, 2022.

- ULIANA, D. S. *et al.* Hortas urbanas comunitárias como ambiente de promoção da saúde e qualidade de vida. *In*: MOTA, J.; MISIAS-MOREIRA, R. (org.). **Perspectivas interdisciplinares sobre qualidade de vida e saúde**. 1. ed. [S. l.]: Pedro & João Editores, 2023. v. 1, p. 61-78.
- ULIANA, D. S. *et al.* Projeto de extensão “PANCCult: cultivando saberes e sabores das plantas alimentícias não convencionais” como instrumento de ensino-aprendizagem sobre a biodiversidade e seu uso sustentável na alimentação. **Revista de Extensão Guará**, [s. l.], 2025.
- WHITTAKER, J. High-protein diets and testosterone. **Nutrition and Health**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 185-191, jun. 2023.

Inovação em produtos probióticos de origem vegetal: elaboração e perspectivas tecnológicas, sensoriais e funcionais

Manueli Monciozo Domingos • Alessandra Peres Guimarães •

Daniel Sgrancio Uliana • Beatriz Almeida Balmant •

Jackline Freitas Brilhante de São José

Com os recentes avanços científicos na compreensão da microbiota intestinal e sua influência na saúde do indivíduo, os probióticos têm ganhado destaque devido ao seu papel fundamental no equilíbrio desse ecossistema (GUARNER *et al.*, 2024). De acordo com a definição estabelecida pela Associação Científica Internacional de Probióticos e Prebióticos (ISAPP), probióticos são microrganismos vivos que, ao serem consumidos em quantidades apropriadas, proporcionam benefícios à saúde do hospedeiro (HILL *et al.*, 2014; LAU; QUEK, 2024). Para que esses benefícios sejam alcançados, estudos indicam

que a ingestão diária recomendada varia entre 10^6 e 10^7 UFC/mL (MAIA, DOMINGOS E SÃO JOSÉ, 2023; RAHMAN *et al.*, 2023).

Segundo dados da literatura científica, o consumo de probióticos tem um papel central no tratamento da disbiose. A mudança no padrão da dieta por alimentos ultraprocessados, o uso exacerbado de antibióticos e o aumento de infecções bacterianas têm contribuído para o agravamento desse quadro. A síndrome do intestino irritável (SII), a doença celíaca e outras doenças intestinais foram associadas a uma deficiência de bactérias benéficas no intestino e redução da diversidade. Dessa maneira, sua ação tem-se concentrado principalmente na modulação do trato gastrointestinal, inibindo microrganismos patogênicos competindo dessa maneira por espaço e recursos, impedindo sua proliferação (BODKE *et al.*, 2022; NASEEM *et al.*, 2023).

Apesar dos benefícios dos probióticos terem sido inicialmente associados ao sistema digestivo, estudos recentes mostram que seu potencial é mais abrangente, contribuindo para a saúde de vários órgãos e sistemas do corpo (D'ALMEIDA *et al.*, 2024). Pesquisas realizadas com camundongos e humanos demonstraram que esses microrganismos podem proporcionar vantagens como a modulação do estresse (MERKOURIS *et al.*, 2024) o fortalecimento do sistema imunológico (MAZZIOTTA *et al.*, 2023), a melhora da saúde da pele (GAO *et al.*, 2023), auxílio na redução da gordura abdominal (ÁLVARIZ-ARRAÑO e MARTÍN-PELÁEZ, 2021) e o equilíbrio hormonal (SZYDŁOWSKA *et al.*, 2021).

Comumente, os probióticos são encontrados em produtos lácteos, que historicamente são as principais matrizes utilizadas para sua incorporação (USAGA *et al.*, 2022; ŞANLIBABA, 2023). No entanto, pesquisas recentes apontaram para um maior interesse dos consumidores por alimentos mais naturais, menos processados e com propriedades funcionais. Alimentos funcionais, além de nutrir o organismo, possuem componentes que conferem benefícios adicionais à saúde, tornando-se uma escolha atraente para diversos

perfis de consumidores (BERNAL-CASTRO; DÍAZ-MORENO; GUTIÉRREZ-CORTÉS, 2019; NASEEM *et al.*, 2023; VOTSI; KOUTELIDAKIS, 2024).

Esse cenário está diretamente relacionado com o aumento das doenças crônicas como diabetes, obesidade e doenças cardiovasculares associadas a um padrão alimentar rico em gorduras saturadas, açúcares e sal. Assim, um maior conhecimento desses riscos, levou muitos a priorizarem uma alimentação mais natural, rica em vitaminas, minerais e fibras como forma de promover o bem-estar e prevenir essas condições (BAKER *et al.*, 2022; HUANGFU *et al.*, 2024; LIANG *et al.*, 2024; VORAGE *et al.*, 2020). Além disso, o crescimento de dietas baseadas em plantas, como o veganismo, vegetarianismo e flexitarianismo, bem como a necessidade de atender indivíduos com alergias ou intolerâncias alimentares, especialmente ao leite de vaca, têm contribuído para a busca por alimentos funcionais de origem vegetal (CRUZ NASCIMENTO *et al.*, 2024; KÜÇÜKGÖZ; TRZĄSKOWSKA, 2022; KUMAR *et al.*, 2022).

Essa tendência tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas à base de vegetais, destacando-se pela capacidade de atender a essa demanda crescente. Nesse contexto, novos estudos têm explorado a viabilidade de adicionar probióticos em matrizes vegetais (BARIK *et al.*, 2023; DZANDU; CHOTIKO; SATHIVEL, 2022; SULTANA *et al.*, 2023; USAGA *et al.*, 2022) mostrando que essas alternativas podem preservar a funcionalidade dos microrganismos, ampliando o leque de opções no mercado de alimentos funcionais (MAIA; DOMINGOS; DE SÃO JOSÉ, 2023; MANOJ *et al.*, 2023).

Este capítulo tem como objetivo explorar as possibilidades de desenvolvimento de alimentos probióticos a partir de matrizes de frutas e hortaliças, abordando os principais processos utilizados para garantir a viabilidade dos microrganismos, os tipos de microrganismos empregados, os benefícios à saúde proporcionados por esses alimentos, além dos desafios enfrentados e das soluções encontradas na produção desses produtos.

Seleção e Caracterização de Estirpes Probióticas

Embora ainda não existam legislações globais ou padrões regulatórios específicos para a seleção e uso dos probióticos, a literatura científica oferece critérios bem estabelecidos que auxiliam a indústria alimentícia na escolha e aplicação desses microrganismos (GUARNER *et al.*, 2024; KÜÇÜKGÖZ; TRZĄSKOWSKA, 2022; KUMAR *et al.*, 2022; LAU; QUEK, 2024). As bactérias do ácido láctico (LAB) são as culturas mais frequentemente utilizadas no desenvolvimento de produtos alimentícios, pertencendo a gêneros como *Lactobacillus*, *Lactocaseibacillus*, *Lactiplantibacillus*, *Limosilactobacillus* e *Bifidobacterium*. Entre esses grupos temos como exemplo: *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*, *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Lactiplantibacillus plantarum subsp. plantarum* e *Bifidobacterium longum*, *B. bifidum*, *B. infantis*, *B. breve*, *B. animalis* e *B. lactis*. Além dessas, espécies como *Streptococcus thermophilus*, *Enterococcus faecium* e a levedura *Saccharomyces cerevisiae* também desempenham um papel importante em produtos probióticos (JAMES; WANG, 2019; MANOJ *et al.*, 2023).

Apesar de grande parte das estirpes serem listadas como Geralmente Reconhecidas como Seguras (GRAS), não apresentando riscos de patogenicidade nem resistência a antibióticos, algumas podem apresentar efeitos colaterais indesejados, incluindo reações alérgicas, infecções oportunistas, complicações no trato gastrointestinal, estímulos excessivos ao sistema imunológico e irregularidades metabólicas. Dessa forma, esse cenário reforça a importância de um controle rigoroso nessa seleção, garantindo tanto a segurança do consumidor, quanto a eficácia do produto final (CHATURVEDI; CHAKRABORTY, 2021; KUMAR *et al.*, 2022; LAU; QUEK, 2024).

Além disso, os probióticos devem ser capazes de inibir microrganismos patogênicos por meio da produção de ácidos orgânicos, bacteriocinas ou exclusão competitiva, promovendo o equilíbrio da microbiota e a proteção contra patógenos. Outro aspecto essencial é a adesão à mucosa intestinal, que permite a formação de barreiras

protetoras, auxilia na colonização e modula positivamente a microbiota residente (CHATURVEDI; CHAKRABORTY, 2021; KUMAR *et al.*, 2022; LAU; QUEK, 2024).

Outro aspecto relevante é a viabilidade desses microrganismos na matriz alimentar. As estirpes devem resistir às condições de processamento dos alimentos, como variações de temperatura, pH, liofilização e oscilações oxidativas, assegurando a estabilidade e funcionalidade durante a vida útil do produto. Contudo, alterações indesejáveis, como a pós-acidificação, podem ocorrer, reduzindo a viabilidade probiótica e comprometendo os benefícios esperados (KUMAR *et al.*, 2022; MEENU., 2024; TRIPATHI; GIRI, 2014).

Após a ingestão, as estirpes enfrentam desafios adicionais no trato gastrointestinal, como a acidez do estômago, sais biliares, metabólitos tóxicos, enzimas digestivas, bacteriófagos e condições anaeróbicas. Para exercerem seus efeitos benéficos, é indispensável que sobrevivam a essas condições e permaneçam viáveis ao longo do trajeto intestinal (PANGHAL *et al.*, 2018; ŞANLIBABA, 2023; TRIPATHI; GIRI, 2014).

Por fim, essa escolha deve considerar as características da matriz alimentar, que impactam diretamente o crescimento, a funcionalidade e a viabilidade dos microrganismos. Alterações como redução do pH e aumento da acidez são comuns e podem impactar propriedades sensoriais e tecnológicas do produto final (SHARMA *et al.*, 2022). A interação entre probióticos e a matriz deve ser analisada cuidadosamente para garantir estabilidade, eficácia e benefícios ao consumidor (KUMAR *et al.*; 2022; KÜÇÜKGÖZ; TRZAŠKOWSKA, 2022; LILLO-PÉREZ *et al.*, 2021).

Matérias-primas vegetais para produtos probióticos

Quando se diz respeito aos alimentos probióticos, as matrizes alimentares mais utilizadas na indústria para inserção de microrganismos são àquelas de origem animal, principalmente derivadas de lácteos. Esta utilização se popularizou por conta das características nutricionais de alimentos como leite, uma vez que o alto teor de água e a composição química facilitam a multiplicação e permanência dos microrganismos (ASPRI, PAPADEMÁS E TSALTAS, 2020; GHAFARI *et al.*, 2022).

No entanto, grande parte da população tem apresentado questões que se opõem ao consumo deste tipo de alimento, seja por preferências, por estilo de vida, por alergias, seja por intolerâncias alimentares (ASPRI, PAPADEMÁS E TSALTAS, 2020; KIRMIZIGUL E SENGUN, 2023). Desta forma, cada vez mais estudos são feitos para a verificação da viabilidade de microrganismos probióticos em matrizes alimentares de origem vegetal (CRUZ, PASSOS E SOUSA JÚNIOR, 2024; DZANDU, CHOTIKO E SATHIVEL, 2022; SANTANA *et al.*, 2020).

A viabilidade diz respeito à capacidade dos microrganismos probióticos de se multiplicarem e permanecerem viáveis na matriz do alimento. Diante disto, algumas características são importantes para que a inserção dos microrganismos seja bem-sucedida no alimento (MAIA, DOMINGOS E SÃO JOSÉ, de, 2023; TERPOU *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2024).

O aspecto de maior importância para a viabilidade na matriz alimentar é a presença de água, vitaminas, minerais e açúcares nos alimentos (LILLO-PÉREZ *et al.*, 2021). Em contrapartida, os principais desafios são a acidez e o pH da matriz em questão. Isto ocorre pois a alta acidez e o baixo pH podem não ser tolerados pelos microrganismos, fazendo com que estes não se multipliquem da maneira adequada (LILLO-PÉREZ *et al.*, 2021; SHARMA *et al.*, 2022).

Entre as matrizes de origem vegetal que têm sido estudadas, encontram-se sucos de frutas, sucos mistos de frutas e hortaliças, bebidas e outros derivados de grãos e oleaginosas (DZANDU, CHOTIKO E SATHIVEL, 2022; MEHAYA *et al.*, 2023; RACHANA PACHORIA *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2020; SHUMYE GEBRE *et al.*, 2024).

Os sucos de frutas e sucos mistos são matrizes muito utilizadas pela presença de açúcares e seu alto teor de água. A laranja, por exemplo, é uma fruta popularmente utilizada para produção de sucos. Assim, estudos já foram realizados para testar a viabilidade de microrganismos probióticos nesta matriz. A fruta apresenta teores de açúcares, vitaminas e minerais importantes que estimulam a multiplicação dos microrganismos. No entanto, o suco de laranja apresenta alta acidez e baixo pH o que traz desafios para a viabilidade desses microrganismos (PATELSKI, DZIEKOŃSKA-KUBCZAK E DITRYCH, 2024; PORTO *et al.*, 2018).

A adição de hortaliças como cenoura, beterraba e entre outras, pode ser uma alternativa a fim de reduzir a acidez do suco. Além disso, podem aumentar as propriedades funcionais, como por exemplo, a presença de mais compostos antioxidantes e prebióticos, que auxiliam na multiplicação dos microrganismos. Os prebióticos são fibras não digeríveis, assim, podem servir de alimento para os microrganismos probióticos, estimulando a sua multiplicação (BOEV *et al.*, 2024; CASSANI, TOMADONI E ROSARIO MOREIRA, del, 2020; PORTO *et al.*, 2018; PUNIA BANGAR *et al.*, 2022).

Grãos e cereais têm sido utilizados para produção de iogurtes, sorvetes e outros produtos probióticos (ADEBO E GABRIELA MEDINA-MEZA, 2020; SHUMYE GEBRE *et al.*, 2024). Em um estudo realizado com iogurte de soja fermentado por *Lactocaseibacillus plantarum* KU985432 e *Saccharomyces boulardii* CNCMI-745, ambos apresentaram resultados satisfatórios, sendo que *S. boulardii* apresentou um resultado superior, uma vez que a cultura é capaz de se manter estável em baixo valor de pH (MEHAYA *et al.*, 2023a). Apesar da soja não apresentar pH baixo, é importante que se leve em conta as

alterações que a cultura probiótica produzirá na matriz. Ao fim do armazenamento, o iogurte de soja com adição de *S. boulardii* apresentou também, maior conteúdo nutricional e atividade antioxidante (MEHAYA *et al.*, 2023a).

Bebidas alcoólicas também têm sido formuladas com microrganismos probióticos. González-Salitre *et al.* (2023) adicionaram *S. boulardii* ao mosto produzido a partir de malte e levaram ao processo de fermentação. Este tipo de matriz se torna benéfica uma vez que apresenta altos teores de selênio, suprimindo as necessidades nutricionais dos indivíduos. Neste caso, o microrganismo probiótico, aumentou a viabilidade do micronutriente. Além disto, os teores altos de carboidratos favorecem o crescimento e multiplicação do microrganismo utilizado (GONZÁLEZ-SALITRE *et al.*, 2023).

Diversas matrizes alimentares de origem vegetal podem ser utilizadas para a formulação de produtos probióticos. Para que a matriz específica seja escolhida, é necessário que se conheça o microrganismo utilizado, suas tolerâncias e preferências, de modo a favorecer a multiplicação deste.

Processos Tecnológicos na Produção de Produtos Probióticos Vegetais

Para ser considerado um alimento probiótico, diversos pré-requisitos são adotados para garantia da funcionalidade e dos benefícios à saúde desse alimento (LILLO-PÉREZ *et al.*, 2021). Dessa forma, esses alimentos precisam apresentar entre 10^8 e 10^9 unidades formadoras de colônia (UFC) do micro-organismo probiótico por grama ou mililitro do produto. Além disso, os microrganismos devem resistir às condições gastrointestinais, e uma quantidade de 10^6 a 10^7 UFC/g ou mL devem alcançar o cólon para promover benefícios à saúde do consumidor (Figura 1) (CRUZ NASCIMENTO; PASSOS; DE SOUSA JÚNIOR, 2024). Entretanto, existem diversos desafios para

a elaboração de alimentos probióticos de origem não láctea, principalmente em relação à sobrevivência dos microrganismos durante o processamento e/ou armazenamento (LILLO-PÉREZ *et al.*, 2021).

Figura 1: Critérios para um alimento ser considerado probiótico



Notas: TGI, trato gastrointestinal; UFC, unidade formadora de colônia; O₂, oxigênio.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As matrizes vegetais apresentam características adversas para a manutenção da viabilidade de microrganismos probióticos, como baixo pH, baixas concentrações de aminoácidos livres e peptídeos, altas concentrações de oxigênio durante o processamento, presença de fatores antinutricionais e falta de capacidade tampão (GUIMARÃES *et al.*, 2025; LILLO-PÉREZ *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2025). Contudo, a indústria alimentícia pode utilizar diversas tecnologias para melhorar a viabilidade dos microrganismos, como encapsulação de células viáveis e fermentação da matéria-prima (GUIMARÃES *et al.*, 2025).

Encapsulação de células viáveis

Conforme apresentado anteriormente, os altos níveis de oxigênio, atividade de água inadequada e as temperaturas durante o processamento

podem reduzir a viabilidade dos probióticos, afetando sua função funcional (WANG *et al.*, 2025). Portanto, para superar as condições adversas mencionadas, bem como para resistir aos processos digestivos, tecnologias de encapsulação de probióticos são desenvolvidas (BU *et al.*, 2025; WANG *et al.*, 2024).

Um sistema de microencapsulação eficiente mantém a atividade probiótica e a liberação das células direcionada ao intestino, mantendo a estabilidade do micro-organismo encapsulado durante o armazenamento do alimento, bem como protege das condições adversas do trato gastrointestinal, aumentando a resistência e a viabilidade (BU *et al.*, 2025). A microencapsulação compreende em capturar uma substância ativa em um material adequado (parede) utilizando algum processo físico-químico ou mecânico, com o objetivo de construir uma barreira entre a substância sensível encapsulada e as condições desfavoráveis a ela. As partículas formadas durante o processo de encapsulamento variam da escala nanométrica à escala milimétrica e a substância encapsulada é denominada de material central. Essa técnica é amplamente conhecida usada para adição de compostos bioativos em alimentos (BU *et al.*, 2025; WANG *et al.*, 2025).

Os materiais poliméricos mais comumente utilizados para o preparo de microcápsulas probióticas incluem alginato, pectina, amido, quitosana, carboximetilcelulose, celulose e proteína do leite. Tais materiais devem atender a requisitos regulatórios e de garantia da manutenção da viabilidade probiótica (BU *et al.*, 2025).

A microencapsulação de probióticos consiste em três etapas. Primeiro, o probiótico é incorporado em uma matriz sólida (aglomerada ou adsorvida) ou líquida (dissolvida ou dispersa). Em seguida, a matriz sólida é pulverizada e, no caso de matriz líquida, ela é dispersa. Por fim, por meio de um processo físico (evaporação, aglomeração e coagulação), químico (polimerização) ou físico-químico (gelificação), o sistema é estabilizado, resultando em um encapsulado do tipo reservatório, tipo matriz ou tipo matriz envolvente. Ainda, após esse processo, as microcápsulas precisam ser secas para remoção

dos solventes e redução do teor de umidade. Geralmente são aplicados a liofilização ou secagem por pulverização, que é de custo mais baixo e mais eficiente (BU *et al.*, 2025).

Dessa forma, considerando as inúmeras características adversas de uma matriz vegetal, a microencapsulação pode criar uma barreira física eficiente para superar o estresse ácido e o ambiente aeróbio, bem como proteger da ação de substâncias antimicrobianas (BU *et al.*, 2025; GUIMARÃES *et al.*, 2025). Esse processo permite a elaboração de produtos probióticos não fermentados, como sucos de frutas e hortaliças (GUIMARÃES *et al.*, 2025; MEENU *et al.*, 2024). Uma revisão recente indicou que sucos de frutas e hortaliças adicionados de *Lactocaseibacillus rhamnosus* microencapsulados tiveram maior viabilidade, quando comparados com sucos que foram adicionados dessa bactéria na forma livre ou liofilizada (GUIMARÃES *et al.*, 2025).

Fermentação

A fermentação é uma tecnologia simples, sustentável e de baixo custo que produz, durante seu processo, diversos ingredientes ativos que conferem benefícios à saúde humana e benefícios tecnológicos para a manutenção de estirpes de microrganismos vivos durante o armazenamento (GUIMARÃES *et al.*, 2025; SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024). Além disso, o processo de fermentação proporciona adaptação à matriz, causando aumento do número de células viáveis (GUIMARÃES *et al.*, 2025). Bactérias lácticas e leveduras podem produzir diversos aminoácidos, vitaminas, enzimas digestivas durante um processo de fermentação.

Os produtos da fermentação aumentam o valor agregado aos alimentos e provocam melhorias das características sensoriais, conferindo sabor e aroma agradável a eles (SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024; YUAN *et al.*, 2024). Isso ocorre porque durante o processo fermentativo, uma série de reações bioquímicas envolvendo os microrganismos e suas enzimas convertem compostos, contribuindo para

o desenvolvimento de sabores diversos. A proporção apropriada de açúcar e ácido presente nos produtos fermentados de frutas propicia um sabor moderadamente doce e ácido. Quando combinados com compostos fenólicos, ésteres, cetonas, álcoois e terpenos, das frutas e hortaliças, são relacionados ao sabor frutado e aromas florais típicos (YUAN *et al.*, 2024).

Além disso, a fermentação degrada compostos tóxicos, aumenta a vida útil dos produtos, uma vez que inibe o crescimento de bactérias deterioradoras, contribuindo para o desenvolvimento de novos alimentos funcionais (SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024).

A fermentação consiste em um processo de transformação biológica e pode ser feita utilizando de diferentes técnicas. Seu objetivo é de obter metabólitos a partir da atividade biológica de um micro-organismo para melhorar a segurança, propriedades nutricionais e vida útil de um alimento (SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024). As técnicas mais utilizadas para fermentação de frutas e hortaliças são: fermentação natural, fermentação de estirpe endógena e fermentação de estirpe comercial (SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024).

Na fermentação natural, estirpes nativas da matérias-primas realizam a fermentação de forma natural, sem a inoculação de estirpes endógenas. Essa técnica permite o crescimento de diferentes espécies de microrganismos, causando alterações sensoriais, no perfil de compostos bioativos, biodisponibilidade de micronutrientes e aumento do prazo de validade (SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024). Outra técnica consiste no isolamento da microbiota autóctone do alimento, permitindo obter estirpes microbianas com capacidade fermentativa satisfatória, visto que são mais adaptadas a tal matéria-prima (LI *et al.*, 2021; SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024). Esta técnica é denominada de fermentação de estirpe endógena (SAUD; XIAOJUAN; FAHAD, 2024).

Além disso, o processo fermentativo pode ser otimizado com a inoculação de estirpes comerciais, permitindo maior controle ao processo, reduzindo o risco de erros e diminuindo o tempo do processo.

As espécies comerciais são cultivadas com estrita garantia de controle de qualidade, sendo as bactérias lácticas e leveduras as mais amplamente comercializadas. Esse processo permite a obtenção de resultados ideais para cada estirpe utilizada e pode ser feita com uma única espécie, ou com espécies mistas. A simbiose entre as diferentes espécies pode culminar em produtos da fermentação mais abundantes e proporcionar mais sabor e maior atividade funcional (SAUD; XIAO-JUAN; FAHAD, 2024).

Também é válido destacar que a composição dos substratos usados e os microrganismos fermentadores são os principais fatores que influenciam os alimentos fermentados (SHARMA *et al.*, 2020). As bactérias lácticas são as mais utilizadas para a produção de bebidas probióticas não lácteas. Entretanto, à medida que a população dessas bactérias cresce, o pH diminui gradualmente. Isso ocorre devido ao processo de fermentação láctica no qual essas bactérias convertem açúcar em ácido láctico sob condições anaeróbicas (MEENU *et al.*, 2024).

Diferente das bactérias lácticas, as leveduras, que também são amplamente utilizadas no desenvolvimento de alimentos probióticos, principalmente bebidas, convertem açúcares em etanol e dióxido de carbono (SANTOS *et al.*, 2023). A espécie de levedura predominante na fermentação de álcoois é *Saccharomyces* (SHARMA *et al.*, 2020). *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* tem sido estudada para elaboração de bebidas alcoólicas probióticas, como cervejas ou outras bebidas à base de frutas. Entretanto, conforme o teor de açúcares diminui na matriz, em decorrência da fermentação alcoólica, as bactérias acéticas oxidam o etanol em ácido acético. Dessa forma, o processo de fermentação alcoólica pode ser estressante para os microrganismos, devido a produção de álcool e ácidos orgânicos (SANTOS *et al.*, 2023).

Diversos alimentos e bebidas probióticas podem ser elaborados a partir da fermentação alcoólica, como o kefir de água, que combina a fermentação alcoólica com a fermentação láctica, em que os microrganismos coexistem em uma associação simbiótica. Essa fermentação geralmente ocorre em temperatura ambiente (25 °C), em condições

anaeróbicas por 24 a 96 horas, resultando em uma bebida fermentada, ácida, efervescente e com aroma frutado (SANTOS *et al.*, 2023).

Kombucha é um exemplo de bebida fermentada, resultado da fermentação do chá-verde ou preto adoçado, utilizando culturas simbióticas de bactérias e leveduras. Durante a fermentação do Kombucha, as leveduras produzem etanol e enzima invertase, que hidrolisa a sacarose em glicose e frutose. Assim, as bactérias do ácido acético oxidam o etanol para a produção de ácido acético e utilizam glicose para produção de ácido glucônico, resultando em uma bebida refrescante, agri-doce e levemente carbonatada, com altos teores de compostos bioativos e atividade antioxidante (LEONARSKI *et al.*, 2022; SOARES; DE LIMA; REOLON SCHMIDT, 2021).

Análise sensorial e estabilidade de produtos de origem vegetal probióticos

A avaliação sensorial de alimentos é essencial para garantir a aceitação pelo consumidor dos produtos elaborados. Em relação à indústria alimentícia, esse é um dos principais objetivos a serem alcançados e, para atingir esse objetivo e garantir que o produto seja escolhido em meio à grande concorrência do setor, os alimentos avaliados precisam atender às expectativas do consumidor (CASTRO *et al.*, 2013; ECHRESH *et al.*, 2025).

A análise sensorial de alimentos envolve a mensuração de atributos como sabor, aroma, textura, cor e aparência geral. Os métodos empregados incluem testes descritivos, discriminativos e afetivos (teste de aceitação e de preferência) nos quais, de acordo com o tipo de teste definido, painelistas treinados, ou consumidores avaliam a qualidade do produto (MINIM, 2013; NOGUEIRA, 2021).

O grande desafio relacionado à avaliação sensorial dos alimentos probióticos é a dinamicidade de sua composição ao longo do tempo. Como os alimentos probióticos contêm microrganismos vivos, o

perfil sensorial pode mudar durante o armazenamento, afetando sabor, textura e aroma (ECHRESH *et al.*, 2025; GUIMARÃES *et al.*, 2025; HINOJOSA-AVILA *et al.*, 2024). Dhakal *et al.* (2024) observaram que combinações probióticas diversas conferem influências únicas nas propriedades reológicas, na textura, na microestrutura e nas propriedades sensoriais de um iogurte à base de tremço e aveia.

Em um estudo realizado por Alves *et al.* (2024), os autores utilizaram uma pesquisa *online* com associação livre de palavras para avaliar a atitude do consumidor em relação a bebidas probióticas e observaram que a categoria saudabilidade, ou seja, a procura por alimentos saudáveis, foi a mais citada. Em seguida, os participantes mencionaram a categoria características sensoriais, com destaque para os atributos de aparência e sabor. Os autores relataram que as características sensoriais das bebidas afetam a aceitação dos sucos probióticos de frutas e hortaliças (ALVES *et al.*, 2024). Ressalta-se, portanto, a importância de avaliar o impacto da adição do probiótico, uma vez que dependendo da matriz, do probiótico e do método escolhido, pode haver alguma modificação sensorial significativa. Freitas *et al.*, (2021), por exemplo, observaram uma redução da aceitação devido à fermentação por *Lactobacillus casei* em um suco de açaí simbiótico.

Por outro lado, em um estudo realizado por Li *et al.* (2023), foi avaliada a influência de diferentes probióticos na fermentação de *Rosa roxburghii* Tratt (RRT). Os autores encontraram que as espécies avaliadas podem melhorar a aparência, cor, aroma e sabor de RRT, sendo o *Lactobacillus acidophilus* especialmente adequado para a melhora do sabor. Esses resultados ocorrem por conta da capacidade dos probióticos analisados de reduzir o conteúdo de aldeídos e outros compostos com sabor desagradável em RRT e aumentar o conteúdo de compostos aromáticos, como álcoois e ésteres (LI *et al.*, 2023). O processo de fermentação probiótica pode aprimorar consideravelmente a aceitação sensorial de alimentos, principalmente devido à síntese de ácido lático, ácido acético e compostos aromáticos (NIAMAH *et al.*, 2024).

A avaliação sensorial também pode ser utilizada para avaliar a estabilidade de armazenamento do produto (DUTCOSKY, 2019). Por sua vez, a estabilidade dos alimentos probióticos vegetais está diretamente relacionada à viabilidade das culturas probióticas ao longo do tempo. Fatores como temperatura de armazenamento, pH, atividade de água e presença de compostos antimicrobianos podem influenciar a sobrevivência das bactérias benéficas (MAIA, DOMINGOS E SÃO JOSÉ, de, 2023; NIKPOUR e HAMED MOSAVIAN, 2025). Análises microbiológicas e físico-químicas são recomendadas para monitorar a população de microrganismos vivos durante o período de prateleira, a fim de garantir que atendam aos requisitos mínimos para serem considerados probióticos (HINOJOSA-AVILA *et al.*, 2024; NIKPOUR E HAMED MOSAVIAN, 2025).

As mudanças físico-químicas que podem ocorrer durante o armazenamento interferem diretamente na percepção sensorial. A acidificação excessiva, degradação de compostos aromáticos e alterações na textura podem afetar a aceitabilidade do produto. Para avaliar essas alterações, testes sensoriais são realizados durante o armazenamento, correlacionando resultados com análises instrumentais, como pH, acidez e viscosidade. Isso é essencial para assegurar a estabilidade sensorial do produto até seu consumo (HINOJOSA-AVILA *et al.*, 2024; NIKPOUR E HAMED MOSAVIAN, 2025).

Propriedades Funcionais e Benefícios à Saúde

Os probióticos apresentam diversos benefícios à saúde, sendo os principais, a melhora da microbiota intestinal. No entanto, diversos benefícios proporcionados por microrganismos probióticos têm sido demonstrados em outros órgãos, como o caso de *Lactobacillus rhamnosus*, que têm apresentado benefícios neurológicos, como a prevenção do comportamento depressivo a partir do eixo microbiota-intestino-cérebro (NISHIDA *et al.*, 2021; SANBORN *et al.*, 2020).

Saccharomyces boulardii é uma levedura com benefícios probióticos de grande relevância para o intestino, especificamente o importante papel na defesa imunológica (FU *et al.*, 2023; SPERANZA *et al.*, 2020).

Muitos microrganismos podem ser utilizados nos alimentos, porém cada espécie irá apresentar particularidades quanto aos benefícios à saúde (FU *et al.*, 2023; NISHIDA *et al.*, 2021). Ao associar o microrganismo com a matriz alimentar vegetal podem ser apresentados novos benefícios funcionais. A seguir, serão apresentados alguns estudos que identificaram benefícios de microrganismos probióticos inseridos em alimentos de origem vegetal.

Quanto aos benefícios à saúde do consumo de probióticos de origem vegetal, necessitam ser realizados mais estudos *in vitro* e *in vivo*, visto a recente tendência da temática. No entanto, alguns trabalhos foram realizados para serem melhor compreendidos os benefícios. WANG *et al.* (2022), em um estudo com modelo animal testaram suco de maçã fermentado a partir de *Lactobacillus fermentum* 21828. O suco foi administrado para os ratos diariamente por 4 dias e foi identificado um efeito antidiabético ao final do experimento.

Algonaiman, Alharbi e Barakat (2022) realizaram um estudo com extrato de aveia fermentado por *Lactobacillus plantarum*. O extrato foi administrado para um modelo de ratos com diabetes induzida. O extrato foi ofertado aos ratos no volume de 7 mL diariamente por 6 semanas. Ao final do experimento, foi identificado que a bebida proporcionou efeito antidiabético e hipolipemiante.

Os compostos bioativos são componentes importantes dos alimentos de origem vegetal, visto que este tipo de matriz é comumente reconhecido pela oferta destes compostos (CHHIKARA *et al.*, 2019; PUNIA BANGAR *et al.*, 2022). Desta forma, é importante reconhecer como a aplicação de microrganismos probióticos pode impactar os compostos na matriz. Neste caso, quando se diz respeito de bebidas fermentadas por microrganismos probióticos, por exemplo, esta interação pode ser benéfica uma vez que os microrganismos são capazes de hidrolisar oligossacarídeos e proteínas presentes

em plantas que não são comumente digeridos no intestino humano, aumentando assim, a biodisponibilidade do composto (HIDALGO-FUENTES *et al.*, 2024).

Em bebidas vegetais fermentadas, os principais compostos bioativos, ou metabólitos gerados ou liberados são polifenóis, vitaminas, peptídeos bioativos, aminoácidos e ácidos orgânicos (HIDALGO-FUENTES *et al.*, 2024). No estudo de Kim *et al.* (2024), por exemplo, foram analisados os extratos de arroz negro e arroz branco fermentados adicionados de *Lactiplantibacillus plantarum* HY7720. Foi identificado que o aminoácido lisina foi aumentado durante a fermentação do extrato, Além disto, a fermentação a partir da cultura probiótica foi capaz de aumentar níveis de vitamina B12 e compostos antioxidantes.

Desafios e soluções

Os principais desafios a serem superados em relação aos alimentos probióticos vegetais envolvem a complexidade das matrizes, a seleção adequada das estirpes, as alterações sensoriais durante o armazenamento, a aceitação do consumidor e a escassez de ensaios clínicos que comprovem seus efeitos à saúde (DOMÍNGUEZ-MURILLO E URÍAS-SILVAS, 2024; HINOJOSA-AVILA *et al.*, 2024; MAIA, DOMINGOS E SÃO JOSÉ, de, 2023; NIKPOUR E HAMED MOSAVIAN, 2025).

A complexidade das matrizes vegetais representa um desafio para o crescimento das culturas probióticas devido a fatores como baixo pH, alta acidez, elevadas concentrações de oxigênio e baixa disponibilidade de aminoácidos livres – características comumente presentes em muitas das matrizes vegetais utilizadas e já citadas neste capítulo (DOMÍNGUEZ-MURILLO E URÍAS-SILVAS, 2024; GUIMARÃES *et al.*, 2025; HINOJOSA-AVILA *et al.*, 2024; NIKPOUR E HAMED MOSAVIAN, 2025). Outros fatores, como o processamento dos alimentos e as condições do armazenamento, também são desafios à

sobrevivência dos probióticos (DOMÍNGUEZ-MURILLO E URÍAS-SILVAS, 2024). No entanto, diversas matrizes estão sendo estudadas atualmente para minimizar essas limitações e ampliar as opções viáveis para a incorporação de probióticos. A presença de componentes prebióticos, por sua vez, pode aumentar a viabilidade dos probióticos (NIAMAH *et al.*, 2024).

Em relação ao mercado, cresce a demanda por alimentos mais saudáveis, mais sustentáveis e ecologicamente corretos, o que favorece os produtos de origem vegetal. No entanto, a aceitação dos alimentos probióticos vegetais ainda enfrenta desafios, visto que não há familiaridade com o sabor desses produtos por grande parte dos consumidores, além das alterações sensoriais que podem ocorrer durante o armazenamento (SHARMA *et al.*, 2024). Esses produtos enfrentam, ainda, uma outra limitação porque muitas estirpes probióticas disponíveis são comercialmente de origem animal, comprometendo sua adequação ao veganismo e exigindo uma análise criteriosa dos ingredientes para garantir a conformidade com esse princípio (NIAMAH *et al.*, 2024).

Diante desses desafios, diversas soluções tecnológicas vêm sendo desenvolvidas para aumentar a viabilidade dos probióticos em alimentos vegetais e ampliar sua aceitação no mercado. Uma dessas estratégias é a microencapsulação, que protege os microrganismos probióticos ao envolvê-los em um microambiente controlado, garantindo sua estabilidade e viabilidade durante o processamento e armazenamento. Esse método permite a liberação controlada dos probióticos no intestino delgado, minimizando os efeitos negativos de condições como oxigênio e temperatura (GUIMARÃES *et al.*, 2025; NIAMAH *et al.*, 2024; SOMERA *et al.*, 2024). Além disso, outras soluções incluem o uso de fermentação controlada, que otimiza a produção de ácidos orgânicos e aumenta a resistência dos probióticos, e a formulação de alimentos com prebióticos, incluindo a coencapsulação, que favorece a proliferação de microrganismos benéficos no trato intestinal. Tais inovações são essenciais para melhorar a

viabilidade dos probióticos e garantir benefícios à saúde, especialmente em produtos à base de plantas (BHUTTO *et al.*, 2025; GUIMARÃES *et al.*, 2025).

Entretanto, para poder ocorrer o desenvolvimento e a comercialização de alimentos probióticos vegetais de maneira eficaz e segura no mercado, os produtos devem atender às regulamentações específicas de cada país. No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabelece critérios para a utilização de probióticos em alimentos, incluindo a comprovação de segurança e eficácia das estirpes utilizadas (BRASIL, 2018). O Guia 21, intitulado “Guia para Instrução Processual de Petição de Avaliação de Probióticos para Uso em Alimentos”, tem o objetivo de fornecer diretrizes sobre as informações essenciais que devem constar no dossiê de avaliação de probióticos em alimentos. Essa análise abrange três aspectos fundamentais: a identificação precisa da linhagem do microrganismo, a comprovação de sua segurança e a demonstração de seus efeitos benéficos à saúde (ANVISA, 2021). Além disso, é necessário que os produtos atendam aos padrões de rotulagem, garantindo que as informações fornecidas ao consumidor sejam claras e precisas (BRASIL, 1999).

Considerações finais

Uma série de critérios são adotados para um alimento ser considerado probiótico, como manter uma contagem de 10^8 a 10^9 UFC/g ou mL do produto, os microrganismos precisam sobreviver à passagem pelo TGI e ter capacidade de colonizar o cólon. As bactérias lácticas e leveduras são os principais microrganismos utilizados para o desenvolvimento de alimentos probióticos de origem vegetal, devido às suas características tecnológicas de boa resistência e manutenção da viabilidade em matrizes vegetais. É sabido que tais matrizes representam um habitat desfavorável à manutenção da viabilidade desses microrganismos, devido ao baixo pH, altas concentrações de oxigênio,

pouca quantidade de aminoácidos e presença de fatores antinutricionais. Entretanto, tais microrganismos apresentam adaptabilidade e resistência a esses fatores.

Os sucos de frutas e hortaliças, bem como bebidas, iogurtes e sorvetes elaborados a partir de grãos e cereais são os alimentos probióticos de origem vegetal mais estudados. Estas matrizes demonstraram ser um ambiente favorável para o desenvolvimento de probióticos não lácteos, mantendo a viabilidade dentro dos parâmetros necessários. Ainda, tecnologias como fermentação e encapsulação destes microrganismos são amplamente empregadas para aumentar a viabilidade e criar barreiras contra o estresse causado pelo microambiente. Tais tecnologias favorecem a manutenção da viabilidade e ainda podem melhorar as características sensoriais do alimento.

Por fim, a ingestão de uma quantidade adequada de probióticos tem sido relacionada a diversos benefícios à saúde, como modulação intestinal e imunológica, melhora da microbiota, prevenção de transtornos depressivos e redução da gordura abdominal.

Referências

- ADEBO, O. A.; MEDINA-MEZA, I. G. Impact of fermentation on the phenolic compounds and antioxidant activity of whole cereal grains: a mini review. **Molecules**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 927, 19 fev. 2020.
- ALGONAIMAN, R.; ALHARBI, H. F.; BARAKAT, H. Antidiabetic and hypolipidemic efficiency of *Lactobacillus plantarum* fermented oat (*Avena sativa*) extract in streptozotocin-induced diabetes in rats. **Fermentation**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 267, 6 jun. 2022.
- ALVES, D. M. M. *et al.* Innovative blends with probiotic potential: processing optimization, bioactive compounds and sensory evaluation of yellow mombin (*Spondias mombin*) and *Talinum*

- triangulare beverages. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 38, 1 dez. 2024.
- ASPRI, M.; PAPADEMAS, P.; TSALTAS, D. Review on non-dairy probiotics and their use in non-dairy based products. **Fermentation**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 30, 26 fev. 2020.
- BAKER, M. T. *et al.* Consumer acceptance toward functional foods: a scoping review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 1217, jan. 2022.
- BARIK, A. *et al.* Fortificação de suco de laranja com Kocuria flava Y4 microencapsulada visando uma nova bebida funcional: aspectos biológicos e de qualidade. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. e17509, 1 jul. 2023.
- BERNAL-CASTRO, C. A.; DÍAZ-MORENO, C.; GUTIÉRREZ-CORTÉS, C. Inclusion of prebiotics on the viability of a commercial *Lactobacillus casei* subsp. *rahmnosus* culture in a tropical fruit beverage. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 987–994, fev. 2019.
- BHUTTO, R. A. *et al.* Recent trends in co-encapsulation of probiotics with prebiotics and their applications in the food industry. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], 1 fev. 2025.
- BODKE, H. *et al.* Role of probiotics in human health. **Cureus**, [s. l.], v. 14, n. 11, 9 nov. 2022.
- BOEV, M. *et al.* Bioactive potential of carrot-based products enriched with *Lactobacillus plantarum*. **Molecules**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 917, 19 fev. 2024.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Guia para instrução processual de petição de avaliação de probióticos para uso em alimentos – Guia 21/2021**. Brasília, DF: Anvisa, 2021.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução nº 18, de 30 de abril de 1999. Aprova o regulamento técnico que estabelece as diretrizes básicas para análise e comprovação de

- propriedades funcionais e ou de saúde alegadas em rotulagem de alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 abr. 1999.
- BRASIL. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 241, de 26 de julho de 2018. Dispõe sobre os requisitos para comprovação da segurança e dos benefícios à saúde dos probióticos para uso em alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 jul. 2018.
- BU, W. *et al.* Encapsulation method of probiotic embedded delivery system and its application in food. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 159, p. 110625, fev. 2025.
- CASSANI, L.; TOMADONI, B.; MOREIRA, M. R. Green ultrasound-assisted processing for extending the shelf-life of prebiotic-rich strawberry juices. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 100, n. 15, p. 5518–5526, 28 dez. 2020.
- CASTRO, W. F. *et al.* Development of probiotic dairy beverages: rheological properties and application of mathematical models in sensory evaluation. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 96, n. 1, p. 16–25, jan. 2013.
- CHATURVEDI, S.; CHAKRABORTY, S. Review on potential non-dairy synbiotic beverages: a preliminary approach using legumes. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 56, n. 5, p. 2068–2077, 1 maio 2021.
- CHHIKARA, N. *et al.* Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: a critical review. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 272, p. 192–200, jan. 2019.
- CRUZ, S. S. n.; PASSOS, T. S.; SOUSA JÚNIOR, F. C. Probiotics in plant-based food matrices: a review of their health benefits. **PharmaNutrition**, [s. l.], v. 28, p. 100390, jun. 2024.
- DHAKAL, D. *et al.* The choice of probiotics affects the rheological, structural, and sensory attributes of lupin-oat-based yoghurt. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 156, 1 nov. 2024.
- DOMÍNGUEZ-MURILLO, A. C.; URÍAS-SILVAS, J. E. Plant-based milk substitutes as probiotic vehicles: health effect and survival, a review. **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 5, 1 dez. 2024.

- DUTCOSKY, S. D. **Análise sensorial de alimentos**. 5. ed. Curitiba: Pucpress, 2019.
- DZANDU, B.; CHOTIKO, A.; SATHIVEL, S. Antioxidant activity and viability of *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Lactocaseibacillus casei*, and co-culture in fermented tomato juice during refrigerated storage. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 50, p. 102085, dez. 2022.
- ECHRESH, S. *et al.* Enhancing grape juice with *Lactocaseibacillus rhamnosus* CWKu-12: assessing probiotic viability, physicochemical changes, sensory characteristics, and quality kinetics throughout storage. **Applied Food Research**, [s. l.], v. 5, n. 1, 1 jun. 2025.
- FREITAS, H. V. *et al.* Synbiotic açai juice (*Euterpe oleracea*) containing sucralose as noncaloric sweetener: processing optimization, bioactive compounds, and acceptance during storage. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 86, n. 3, p. 730-739, 2021.
- FU, J. *et al.* Unique probiotic properties and bioactive metabolites of *Saccharomyces boulardii*. **Probiotics and Antimicrobial Proteins**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 967–982, 24 ago. 2023.
- GHAFFARI, M. *et al.* Consumers' motivations for adopting a vegan diet: a mixed-methods approach. **International Journal of Consumer Studies**, [s. l.], v. 46, n. 4, p. 1193–1208, 23 jul. 2022.
- GONZÁLEZ-SALITRE, L. *et al.* Physicochemical and microbiological parameters during the manufacturing of a beer-type fermented beverage using selenized *Saccharomyces boulardii*. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 10, 1 out. 2023.
- GUARNER, F. *et al.* World Gastroenterology Organisation Global Guidelines: probiotics and prebiotics. **Journal of Clinical Gastroenterology**, [s. l.], v. 58, n. 6, p. 533, jul. 2024.
- GUIMARÃES, A. P. *et al.* *Lactocaseibacillus rhamnosus*: an overview of the viability in fruit and vegetable juices and their potential effects on human health. **Probiotics and Antimicrobial Proteins**, [s. l.], 4 fev. 2025.

- HIDALGO-FUENTES, B. *et al.* Plant-based fermented beverages: nutritional composition, sensory properties, and health benefits. **Foods**, [s. l], v. 13, n. 6, p. 844, 10 mar. 2024.
- HILL, C. *et al.* The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, [s. l], v. 11, n. 8, p. 506–514, ago. 2014.
- HINOJOSA-AVILA, C. R. *et al.* Exploring the potential of probiotic-enriched beer: microorganisms, fermentation strategies, sensory attributes, and health implications. **Food Research International**, [s. l], 1 jan. 2024.
- HUANGFU, P. *et al.* Impact of price reductions, subsidies, or financial incentives on healthy food purchases and consumption: a systematic review and meta-analysis. **The Lancet Planetary Health**, [s. l], v. 8, n. 3, p. e197–e212, 1 mar. 2024.
- JAMES, A.; WANG, Y. Characterization, health benefits and applications of fruits and vegetable probiotics. *CyTA – Journal of Food*, [s. l], v. 17, n. 1, p. 770–780, 1 jan. 2019.
- KIM, J. Y. *et al.* Evaluation of antioxidant activity and fermentation properties of potential probiotic strain *Lactiplantibacillus plantarum* HY7720 in plant-based materials. **Discover Applied Sciences**, [s. l], v. 6, n. 5, p. 233, 29 abr. 2024.
- KIRMIZIGUL, A.; SENGUN, I. Y. Traditional non-dairy fermented products: a candidate for probiotics. **Food Reviews International**, [s. l], p. 1–21, 15 maio 2023.
- KÜÇÜKGÖZ, K.; TRZĄSKOWSKA, M. Nondairy probiotic products: functional foods that require more attention. **Nutrients**, [s. l], v. 14, n. 4, p. 753, 10 fev. 2022.
- KUMAR, S. *et al.* Trends in non-dairy-based probiotic food products: advances and challenges. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l], v. 46, n. 9, set. 2022.

- LAU, L. Y. J.; QUEK, S. Y. Probiotics: health benefits, food application, and colonization in the human gastrointestinal tract. **Food Bioengineering**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 41–64, 2024.
- LEONARSKI, E. *et al.* Production process and characteristics of Kombucha fermented from alternative raw materials. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 49, p. 101841, out. 2022.
- LI, B. *et al.* Effects of probiotics on antioxidant activity, flavor compounds and sensory evaluation of *Rosa roxburghii* Tratt. **LWT**, [s. l.], v. 179, 1 abr. 2023.
- LI, S. *et al.* Fermentation of blueberry juices using autochthonous lactic acid bacteria isolated from fruit environment: fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles. **Chemosphere**, [s. l.], v. 276, p. 130090, ago. 2021.
- LIANG, D. *et al.* Commercial probiotic products in public health: current status and potential limitations. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 64, n. 19, p. 6455–6476, 25 jul. 2024.
- LILLO-PÉREZ, S. *et al.* Probiotics in fruit and vegetable matrices: opportunities for nondairy consumers. **LWT**, [s. l.], v. 151, p. 112106, nov. 2021.
- MAIA, M. S.; DOMINGOS, M. M.; SÃO JOSÉ, J. F. B. de. Viability of probiotic microorganisms and the effect of their addition to fruit and vegetable juices. **Microorganisms**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1335, 19 maio 2023.
- MANOJ, P. M. *et al.* Fruit based probiotic functional beverages: a review. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l.], v. 14, p. 100729, 1 dez. 2023.
- MEENU, M. *et al.* The golden era of fruit juices-based probiotic beverages: recent advancements and future possibilities. **Process Biochemistry**, [s. l.], v. 142, p. 113–135, jul. 2024.
- MEHAYA, F. M. *et al.* Evaluation of nutritional and physicochemical characteristics of soy yogurt by *Lactobacillus plantarum*

- KU985432 and *Saccharomyces boulardii* CNCMI-745. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 13026, 10 ago. 2023.
- MERKOURIS, E. *et al.* Probiotics' effects in the treatment of anxiety and depression: a comprehensive review of 2014–2023 clinical trials. **Microorganisms**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 411, fev. 2024.
- MINIM, V. P. R. **Análise sensorial**: estudos com consumidores. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013.
- NASEEM, Z. *et al.* Probioticated fruit juices-Health benefits, challenges and future perspective. **Nutrition**, [s. l.], p. 112154, jul. 2023.
- NIAMAH, A. K. *et al.* Phytophagous probiotic foods: exploring the intersection of characteristics, quality implications, health benefits, and market dynamics. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], 1 dez. 2024.
- NIKPOUR, S.; HAMED MOSAVIAN, M. T. Formulation of functional probiotic dairy dessert with date honey as a sucrose replacement: chemical, physical, and sensory analysis. **Heliyon**, [s. l.], v. 11, n. 1, 15 jan. 2025.
- NISHIDA, K. *et al.* Daily intake of *Lactobacillus gasseri* CP2305 ameliorates psychological premenstrual symptoms in young women: a randomized, double-blinded, placebo-controlled study. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 80, p. 104426, maio 2021.
- NOGUEIRA, M. B. Fundamentos e introdução à análise sensorial. [S. l.]: **Mérida Publishers**, 2021. cap. 1.
- PACHORIA, R. *et al.* **Studies on development of probioticated coconut water experiment findings**. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- PANGHAL, A. *et al.* Potential non-dairy probiotic products – a healthy approach. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 21, p. 80–89, 1 fev. 2018.
- PATELSKI, A. M.; DZIEKOŃSKA-KUBCZAK, U.; DITRYCH, M. The fermentation of orange and black currant juices by the probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 3009, 3 abr. 2024.

- PORTO, M. R. A. *et al.* Beet and orange mixed juices added with *Lactobacillus acidophilus*. **Nutrition & Food Science**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 76–87, 12 fev. 2018.
- PUNIA BANGAR, S. *et al.* Bioactive potential of beetroot (*Beta vulgaris*). **Food Research International**, [s. l.], v. 158, p. 111556, ago. 2022.
- RAHMAN, M. S. *et al.* Recent advances in probiotication of fruit and vegetable juices. **Journal of Advanced Veterinary and Animal Research**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 522–537, set. 2023.
- SANBORN, V. *et al.* Randomized clinical trial examining the impact of *Lactobacillus rhamnosus* GG probiotic supplementation on cognitive functioning in middle-aged and older adults. **Neuropsychiatric Disease and Treatment**, [s. l.], v. 16, p. 2765–2777, 2020.
- SANTANA, R. V. *et al.* Quality parameters and sensorial profile of clarified “Cerrado” cashew juice supplemented with *Sacharomyces boulardii* and different sweeteners. **LWT**, [s. l.], v. 128, 2020.
- SANTOS, D. C. D. *et al.* Challenges in maintaining the probiotic potential in alcoholic beverage development. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 52, p. 102485, abr. 2023.
- SAUD, S.; XIAOJUAN, T.; FAHAD, S. The consequences of fermentation metabolism on the qualitative qualities and biological activity of fermented fruit and vegetable juices. **Food Chemistry: X**, [s. l.], v. 21, p. 101209, mar. 2024.
- SHARMA, R. *et al.* Barley-based probiotic food mixture: health effects and future prospects. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 62, n. 29, p. 7961–7975, 17 out. 2022.
- SHARMA, R. *et al.* Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. **Fermentation**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 106, 6 nov. 2020.
- SHUMYE GEBRE, T. *et al.* Unveiling the potential of African fermented cereal-based beverages: probiotics, functional drinks,

- health benefits and bioactive components. **Food Research International**, [s. l.], v. 191, p. 114656, set. 2024.
- SOARES, M. G.; LIMA, M. de; REOLON SCHMIDT, V. C. Technological aspects of Kombucha, its applications and the symbiotic culture (*SCOBY*), and extraction of compounds of interest: a literature review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 110, p. 539–550, abr. 2021.
- SOMERA, T. *et al.* Unconventional foods and by-products as sustainable encapsulating materials carrying probiotic cultures: an overview of the encapsulation methods, and incorporation on food products. **Food Bioscience**, [s. l.], 1 out. 2024.
- SPERANZA, B. *et al.* Biofilm formation by potentially probiotic *Saccharomyces cerevisiae* strains. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 87, p. 103393, maio 2020.
- SULTANA, M. *et al.* Functional orange juice with *Lactobacillus casei* and tocotrienol-enriched flaxseed oil co-encapsulation: physico-chemical properties, probiotic viability, oxidative stability, and sensorial acceptability. **LWT**, [s. l.], v. 188, p. 115388, 1 out. 2023.
- TERPOU, A. *et al.* Probiotics in food systems: significance and emerging strategies towards improved viability and delivery of enhanced beneficial value. **Nutrients**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 1591, 13 jul. 2019.
- TRIPATHI, M. K.; GIRI, S. K. Probiotic functional foods: survival of probiotics during processing and storage. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 9, p. 225–241, jul. 2014.
- USAGA, J. *et al.* Probiotics survival and betalains stability in purple pitaya (*Hylocereus* sp.) juice. **NFS Journal**, [s. l.], v. 27, p. 47–53, jun. 2022.
- VORAGE, L. *et al.* The association of demographic characteristics and food choice motives with the consumption of functional foods in emerging adults. **Nutrients**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 2582, set. 2020.

- VOTSI, I. C.; KOUTELIDAKIS, A. E. Functional foods' consumption in children and parents: a literature review. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1492, jan. 2024.
- WANG, X. *et al.* Evaluating the changes in phytochemical composition, hypoglycemic effect, and influence on mice intestinal microbiota of fermented apple juice. **Food Research International**, [s. l.], v. 155, p. 110998, maio 2022.
- WANG, X. *et al.* Research advances on encapsulation of probiotics with nanomaterials and their repair mechanisms on intestinal barriers. **Food Science and Human Wellness**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 3095–3109, nov. 2024.
- WANG, Y. *et al.* Electrostatic spraying encapsulation of probiotic-loaded W/O/W emulsion in sodium alginate microspheres to enhance probiotic survival stability. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 284, p. 138005, jan. 2025.
- YU, H. *et al.* Improved viability of probiotics by encapsulation in chickpea protein matrix during simulated gastrointestinal digestion by succinylated modification. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 260, p. 129614, mar. 2024.
- YUAN, X. *et al.* Recent advances of fermented fruits: a review on strains, fermentation strategies, and functional activities. **Food Chemistry: X**, [s. l.], v. 22, p. 101482, jun. 2024.

Sorgo em perspectiva: uma abordagem inovadora para a alimentação humana com sustentabilidade

*Guilherme Augusto Loiola Passos • Maria Julia Bernardone Lima •
Aline Lopes • Erica Aguiar Moraes*

No mundo, os cereais integrais vêm despertando continuamente a atenção de pesquisadores, dada a sua importância para a alimentação humana, como os efeitos na prevenção e na redução dos danos de doenças crônicas não transmissíveis (DCNTs) (HU *et al.*, 2020). Entre esses cereais, o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] tem ganhado destaque, principalmente, devido à sua composição nutricional, visto que é rico em fibras alimentares e em compostos fenólicos, incluindo os taninos e, além dos benefícios relacionados ao seu cultivo que demanda baixo consumo de água (KHALID *et al.*, 2022).

Largamente consumido por humanos em países do continente africano e asiático, o sorgo é a base da alimentação nesses países, onde a produção de outros cereais como o milho e o trigo não são favoráveis. Entretanto, a maior parte da produção mundial do cereal é

voltada à alimentação animal, incluindo países como Estados Unidos, Brasil e Austrália. Apesar disso, tendo em vista o seu valor nutricional e vantagens produtivas, vários estudos têm sido desenvolvidos com utilização do sorgo como ingrediente em diferentes produtos alimentícios como panificados e outros produtos inovadores (AGUIAR *et al.*, 2023; CURTI *et al.*, 2021; NOERHARTATI *et al.*, 2020; OLIVEIRA, de *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022; QUEIROZ *et al.*, 2020, 2022; REDDY *et al.*, 2019; RUMLER, BENDER E SCHÖNLECHNER, 2022).

No Brasil, de acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), a produção de sorgo tem apresentado um crescimento anual significativo, alcançando um pico de 36% em uma única safra no ano de 2022 (Embrapa, 2022). Para 2024 e 2025 a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) estima que sejam produzidos no Brasil, 322,53 milhões de toneladas de sorgo (CONAB, 2024). Esse aumento ressalta a importância do grão, especialmente considerando que a produção de trigo, além de mais cara, nem sempre é viável em todas as regiões do país. Nesse contexto, o sorgo se apresenta como uma alternativa promissora, devido à sua tolerância à seca e capacidade de se desenvolver em áreas com menor regime pluviométrico, como o Nordeste brasileiro. Essas características tornam o cereal uma opção economicamente viável, nutricionalmente relevante e ambientalmente sustentável, contribuindo para a diversificação das matérias-primas utilizadas na produção de alimentos (QUEIROZ *et al.*, 2011).

Além disso, suas características únicas de produtividade e resiliência o tornam extremamente relevante para a segurança alimentar, possibilitando o desenvolvimento de novos produtos que podem beneficiar inúmeras pessoas tanto do ponto de vista nutricional quanto ambiental, em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) (HOSSAIN *et al.*, 2022). Diante do exposto, são apresentadas, neste capítulo, informações relevantes sobre o potencial nutricional do

sorgo para inovação no contexto da alimentação humana e do desenvolvimento de novos produtos, além de benefícios potenciais de seu consumo para a saúde, sem, no entanto, dissociá-lo da importância da sustentabilidade em todos os processos, desde a produção do grão ao seu aproveitamento na indústria.

Sorgo, uma alternativa sustentável

Inovar é ser sustentável

A produção de alimentos no Brasil e no mundo enfrenta e enfrentará ainda mais dificuldades com as mudanças climáticas e o aquecimento global. Nesse contexto, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) prevê, em seus Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), a sustentabilidade como um dos pilares para a manutenção e desenvolvimento de uma agricultura capaz de atender às necessidades alimentares de uma população em constante crescimento (ONU, 2025; WILLETT *et al.*, 2019). Dessa forma, a busca por novas fontes alimentares que promovam o desenvolvimento de uma “nova agricultura” torna-se essencial para garantir um futuro sustentável e assegurar alimentos para todos (MAJZOOBI *et al.*, 2023).

No contexto de uma demanda consistente pelo desenvolvimento sustentável, entre as inúmeras vantagens do uso do sorgo, uma das mais importantes é a sua resiliência e sua capacidade de responder de forma bioquímica, fisiológica e molecular às pressões do meio ambiente, conferindo ao grão alta produtividade e rendimento. O cereal é caracterizado por ser tolerante aos estresses de condições climáticas extremas, como as das regiões áridas e semiáridas, enfrentando veemente secas e solos pobres (LIU *et al.*, 2024). De acordo com Mansour e colaboradores (2021), o sorgo possui boa adaptação a ambientes salinos, uma vez que suas atividades metabólicas e fotossintéticas permanecem constantes em meios de concentração

de salinidade moderada, confirmando assim seu potencial em resistir em ambientes e condições estressantes.

Uma relevante exemplificação do nível de adaptabilidade do sorgo a fatores ecossistêmicos é a sua habilidade de captação de água através dos sistemas radiculares da planta, tornando menor a necessidade de irrigação para a manutenção dos recursos de água durante o cultivo do cereal, sendo mais resistente a seca do que outros grãos, como o milho (ADU *et al.*, 2023; PONTIERI *et al.*, 2024). Além disso, o sorgo também é resistente contra pragas e insetos e possui um baixo custo de produção que leva a um menor valor do produto final que será comercializado (ANUNCIAÇÃO *et al.*, 2017; CONAB, 2024; FAO, 2020; LIU *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2022).

A resiliência do sorgo é especialmente relevante diante das perturbações climáticas, como elevação de temperaturas, secas prolongadas e eventos climáticos extremos, que comprometem a produção de outras culturas. Em um contexto de insegurança alimentar, a perda de plantios de alimentos afeta em muito as regiões mais vulneráveis e seus habitantes. Ao se tratar de segurança alimentar, há grandes vantagens na produção de sorgo, uma vez que é um dos cultivos mais resilientes às condições extremas de clima e é capaz de enfrentar provocações de fatores abióticos e bióticos do ecossistema. Assim, o grão atua como um importante gênero agrícola que resiste a agentes ambientais adversos, dispensa de grandes quantidades de insumos, mantém boa produtividade e rendimento e possui uma composição rica em nutrientes essenciais e compostos funcionais, colaborando em vários aspectos para a redução da insegurança alimentar (CHADALAVADA, KUMARI E KUMAR, 2021)

O sorgo, como um cereal amplamente cultivado, gera resíduos como farelo, folhas, caules e raízes, que possuem grande potencial para práticas sustentáveis e produtos de valor agregado. O farelo de sorgo, subproduto da moagem, é geralmente descartado ou usado como ração, mas estudos destacam seu uso na produção de glucoamilase, ceras naturais e farinhas sem glúten (KHODDAMI *et al.*, 2023).

Sua fragilidade em relação a outros farelos, como o de trigo, torna-o atrativo para a indústria alimentícia, enquanto os resíduos da colheita geram biomassa, ampliando suas possibilidades de uso sustentável (HOU *et al.*, 2020; KHODDAMI *et al.*, 2023). Além disso, pode atuar como corante natural e conservante antioxidante, melhorando a qualidade e a durabilidade dos alimentos, com atividade antioxidante superior à de frutas como mirtilos (LI *et al.*, 2021).

Dessa forma, o sorgo não é apenas uma cultura adaptada às adversidades climáticas, mas também um grão funcional que atende a múltiplas demandas: sustentabilidade, segurança alimentar e saúde. O fortalecimento de pesquisas voltadas para o aprimoramento de suas características nutricionais, sensoriais e tecnológicas é essencial para expandir seu uso e atrair tanto consumidores quanto indústrias. Assim, o sorgo pode desempenhar um papel central na construção de um sistema alimentar mais sustentável e resiliente, alinhado aos desafios do futuro.

Propriedades nutricionais e funcionais do sorgo

Composição nutricional

Sendo um cereal, os carboidratos são os componentes principais presentes na estrutura dos grãos de sorgo e podem variar de 57,3g a 83,45g/100g de acordo com o genótipo (MARTINO *et al.*, 2012; PALAVECINO *et al.*, 2017). Quanto ao amido, o cereal apresenta um dos níveis mais elevados de amido resistente entre os cereais, com alguns genótipos como o SC59 podendo chegar a 65,65 g/100g (TEIXEIRA *et al.*, 2016). Alguns genótipos ainda podem apresentar baixos níveis de amilose, um dos dois principais componentes do amido do sorgo, composto por amilose e amilopectina. Tal variação nas concentrações das frações de amido evidencia a influência genética e ambiental no teor e na qualidade desses nutrientes, que por sua vez

influenciam diretamente nas características de processamento dos grãos, tais como gelatinização e retrogradação. O amido presente no sorgo apresenta uma das menores digestibilidades, isso deve-se a interação estreita dos grânulos de amido com as proteínas e taninos (BARROS; AWIKA; ROONEY, 2012; TAYLOR; DUODU, 2023)

Entre as fibras alimentares do sorgo, o grão é majoritariamente composto por fibras do tipo insolúvel, que representam de 75 a 90% do total, enquanto as fibras solúveis variam de 10 a 25% (XIONG *et al.*, 2019). Sua composição conta principalmente com arabinoxilanas, β -glucanas e lignanas que desempenham papel crucial na redução do risco do desenvolvimento de DCNTs como o diabetes mellitus tipo 2 (DM2), pois atuam na redução do índice glicêmico dos alimentos, dos níveis do colesterol e de triglicerídeos plasmáticos (STEFOSKA-NEEDHAM; BECK; TAPSELL, 2016). Além disso, várias variedades de sorgo apresentam conteúdo elevado de amido resistente, que também é conhecido como um tipo de fibra alimentar e pode ser relevante no desenvolvimento de produtos com índices elevados de fibras (AWIKA; ROONEY, 2004).

Relativo às proteínas do sorgo, elas se dividem entre prolaminas e não prolaminas, sendo a primeira responsável por 77 a 82% do total de proteínas (7 a 15g/100g) e conhecida como kafirinas. As albuminas, globulinas e glutelinas correspondem ao restante das proteínas do sorgo. O ácido glutâmico, a prolina e a leucina são os aminoácidos abundantes no sorgo, enquanto a lisina, assim como em outros cereais, está presente em menor quantidade, o que incide diretamente na qualidade proteica dos cereais em geral. A porção das kafirinas no cereal é altamente polimerizada e possui muitas pontes de dissulfeto e por isso não são enzimaticamente digeridas no trato gastrointestinal. Além disso, a presença de compostos fenólicos, em especial os taninos do sorgo, complexam-se com as proteínas impedindo sua digestão e subsequente absorção. Tal característica do sorgo o torna especialmente relevante no manejo de doenças como obesidade e diabetes tipo II, dada a sua menor digestibilidade do amido e proteínas

(MORAES *et al.*, 2018; TAYLOR *et al.*, 2007). O cereal ainda se destaca por não possuir em sua composição o glúten, sendo, portanto, de interesse na elaboração de produtos para pessoas com restrição a essa proteína (CHÁVEZ *et al.*, 2018). Estudos mostram que a substituição parcial ou total da farinha de trigo ou outras farinhas pela de sorgo é possível em diversas matrizes, como pães, bolos, biscoitos, massas, cereais matinais, entre outros alimentos (OLIVEIRA *et al.*, 2017, 2022; OLIVEIRA, de *et al.*, 2022; REIS GALLO *et al.*, 2021). Entretanto, o sorgo não é apenas uma excelente alternativa de grão integral para substituir alimentos altamente refinados à base de amido, sem glúten, mas também é uma adição nutritiva a uma dieta saudável (MCGINNIS; PAINTER, 2020).

A porção lipídica do cereal é mínima, correspondendo entre 1,24 e 3,07g/100g, assemelhando-se a do milho, porém mais insaturada (MARTINO *et al.*, 2012). A maior concentração é de ácidos graxos poli-insaturados, que contam como 83 a 88% do perfil lipídico do cereal. Os principais ácidos graxos do sorgo são os ácidos oleico, linoleico, palmítico, linolênico e esteárico (USDA, 2019).

De modo geral, o genótipo, as condições climáticas, do solo e manejo da cultura podem influenciar diretamente na variação do perfil nutricional dos grãos de sorgo. Sua composição ainda abrange minerais como cálcio, cobre, enxofre, ferro, fósforo, magnésio e zinco, os quais foram encontrados em todos os genótipos estudados por MARTINO *et al.* (2012).

Compostos fenólicos do sorgo

A classificação do sorgo, em geral, dá-se pela sua aparência e total de polifenóis extraíveis. Os sorgos-brancos, os quais são conhecidos por sua aplicabilidade na indústria de alimentos dada sua semelhança às farinhas comuns, não possuem antocianinas e, em geral tem baixo nível total de polifenóis. Os grãos vermelhos, por sua vez, podem ou não conter taninos e possuem pericarpo com um significativo número

de polifenóis extraíveis. De modo geral, os sorgos com pericarpo marrom e preto possuem níveis elevados de polifenóis, taninos e antocianinas. Dado o exposto, a elaboração de novos produtos deve considerar a cor destes produtos, uma vez que o sorgo fornece uma gama de colorações e essas podem influenciar diretamente na sua aceitação (KHALID *et al.*, 2022).

Considerado um cereal rico em nutrientes biologicamente ativos, o sorgo apresenta uma diversidade de compostos benéficos à saúde (KHALID *et al.*, 2022; PRZYBYLSKA-BALCEREK; FRANKOWSKI; STUPER-SZABLEWSKA, 2019). Entre todos esses componentes, que variam largamente entre os genótipos existentes, os mais abundantes no cereal são os compostos fenólicos. Advindos do metabolismo secundário das plantas ou de seus componentes celulares, os principais fenólicos encontrados no sorgo são os taninos condensados, os ácidos fenólicos e os flavonoides. O perfil único desses compostos no sorgo deve-se majoritariamente ao alto conteúdo de ácidos fenólicos e de flavonoides, em que se destacam os taninos condensados (ALTHWAB *et al.*, 2015; XIONG *et al.*, 2019)

Taninos condensados

Os taninos condensados têm sido um dos polifenóis mais estudados no cereal, podendo ainda ser mencionado como um dos fenólicos do sorgo com maior poder antioxidante (JIANG *et al.*, 2020). Diferente das antocianinas, os taninos estão largamente distribuídos entre as plantas, como nas uvas, chás, chocolates, banana e legumes. Entretanto, no sorgo os taninos estão na forma condensada (proantocianidinas ou procianidinas), com alto peso molecular e alto grau de polimerização, forma essa que não é comumente encontrada em outros cereais. As formas moleculares de baixo peso, principalmente os monômeros (catequinas) e dímeros (procianidina B1) estão presentes em pequenas quantidades no grão. De modo geral, o conteúdo desses componentes, que se encontra na testa pigmentada do grão,

pode variar no sorgo de acordo com o genótipo (Figura 1) (MORAES *et al.*, 2015; XIONG *et al.*, 2019)

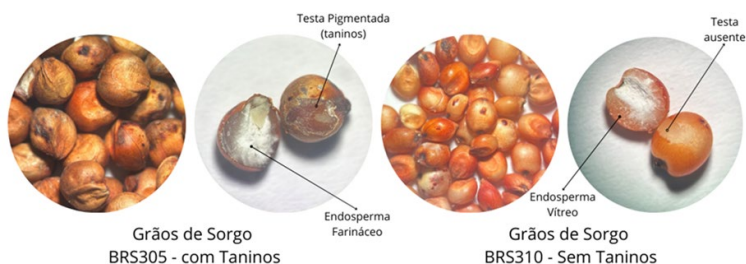
No sorgo, a coloração dos seus grãos e a espessura de seu pericarpo influenciam diretamente a atividade antioxidante. Um estudo que caracterizou os compostos fenólicos em 5 genótipos de sorgo (pericarpos: vermelho, branco, marrom, preto e branco pérola) via Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) encontrou que os genótipos com pericarpo marrom e vermelho apresentaram maiores níveis de protoantocianidinas (taninos) e compostos fenólicos totais, de maneira que a atividade antioxidante geral também foi superior aos demais genótipos estudados. A pesquisa reforça, ainda, que a alta atividade antioxidante e conteúdo de polifenóis no sorgo podem ser muito explorados para alimentação humana (PUNIA *et al.*, 2021).

Apesar de seu potencial antioxidante, complexação com proteínas e carboidratos que se manifestam como pontos favoráveis à prevenção de DCNTs, os taninos apresentam algumas características sensoriais como amargor e adstringência. Por muitas vezes essas características sensoriais são confundidas, à medida que a adstringência é costumeiramente acompanhada do amargor e essa associação pode confundir os consumidores quanto a essas propriedades do sabor. Ademais, esses atributos sensoriais dos taninos podem ser associados à redução da aceitação de produtos à base de sorgo ricos em taninos (SOARES *et al.*, 2020). Entretanto, em um estudo de Queiroz e colaboradores (2020) verificou-se que não houve diferença significativa nos critérios aroma e sabor entre os churros elaborados de sorgo com ou sem tanino. Este possibilitou elaboração de produtos com melhores características nutricionais, uma vez que a presença dos taninos não resultou em avaliação negativa do produto elaborado (QUEIROZ *et al.*, 2020). Por outro lado, Oliveira e colaboradores (2022) avaliaram sensorialmente macarrões sem glúten feitos com diversos genótipos de sorgo (branco comercial, branco CMSXS 180, vermelho BR 332 e 330, marrom BRS 305 e marrom 1167048) e observaram baixa aceitação e menor nota para sabor para o macarrão

feito a partir do genótipo BRS 305. Nesse contexto, os autores mencionam a necessidade de avaliar o efeito dos taninos em produtos elaborados com farinhas ricas nesse composto, como a BRS 305.

Diferentemente dos vinhos e bebidas em que os taninos estão livres nas soluções, em produtos amiláceos e com proteínas, os taninos estão complexados. Reduzindo, desse modo, sua capacidade de impactar negativamente nos atributos sensoriais dos produtos elaborados, uma vez que os taninos podem não interagir com as proteínas salivares, nem com os receptores de sabor da língua. Além disso, o processamento térmico aos quais esses alimentos são submetidos podem influenciar nessa redução da percepção dos taninos, uma vez que eles podem aumentar a interação dos taninos com carboidratos e proteínas (GIRARD; AWIKA, 2018).

Figura 1: Grãos e estrutura de sorgo utilizados no estudo, evidenciando a presença de taninos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ácidos fenólicos

Os ácidos fenólicos são os compostos mais simples e ainda abundantes que estão presentes em todos os grãos de sorgo, alcançando concentrações de 445 a 2.850 $\mu\text{g/g}$ (GIRARD; AWIKA, 2018). Suas duas principais categorias estão diretamente relacionadas a sua estrutura: os derivados do ácido benzoico e os derivados do ácido hidroxicinâmico.

Os ácidos fenólicos mais reportados no grão de sorgo são os ácidos gálico, vanílico, protocatecuico, cinâmico, p-cumárico, p-hidroxibenzoico, siringico, ferúlico, cafeico e sinápico, estes conhecidos por oferecer diversos benefícios à saúde, incluindo efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios. (LI *et al.*, 2022; XU; WANG; ZHAO, 2021) O ácido protocatecuico, ou ácido 3,4-dihidroxibenzoico, é um composto fenólico amplamente encontrado em frutas, plantas medicinais, nozes e vegetais. Pertencente ao grupo dos ácidos fenólicos, mais especificamente aos ácidos benzoicos, esse composto tem sido extensivamente estudado devido aos seus diversos benefícios à saúde, incluindo propriedades antioxidantes, antimicrobianas e antitumorais (SERNA-LOAIZA *et al.*, 2019).

É válido destacar que no sorgo os ácidos fenólicos não estão diretamente relacionados à presença de outros compostos como os taninos e antocianinas, significando que os níveis desses componentes no grão são relativamente próximos aos demais cereais. Os ácidos fenólicos estão presentes no endosperma, pericarpo e testa do grão e existem na forma livre e ligada. Os ácidos livres, comumente extraídos por solventes orgânicos, estão mais presentes no pericarpo e testa do grão. Comumente estão monomericamente ligados a carboidratos e glicerol. Contudo, em torno de 70 a 95% dos ácidos fenólicos do sorgo estão na configuração ligada, presentes nas paredes celulares. Entre os ácidos fenólicos ligados, o principal é o ácido ferúlico (100 a 500 $\mu\text{g/g}$), que corresponde a aproximadamente 90% do conteúdo desses componentes. Para que estes sejam extraídos são requeridas condições ácidas ou alcalinas, aliada muitas vezes a altas temperaturas, a fim de clivar as ligações covalentes que unem esses compostos às paredes celulares (WU *et al.*, 2017). Justamente por essas extensivas ligações covalentes, os ácidos fenólicos ligados possuem baixa biodisponibilidade, sendo resistentes à digestão das enzimas (SAURA-CALIXTO, 2011). Os ácidos fenólicos estão presentes principalmente na camada do farelo do grão, mas também no endosperma e no pericarpo; assim, produtos integrais de sorgo são uma fonte mais rica

desses compostos em comparação aos derivados de grãos descascados (MORAES *et al.*, 2015).

O sorgo é rico em compostos fenólicos bioativos, como ácido ferúlico, ácido gálico e ácido vanílico, conhecidos por oferecer diversos benefícios à saúde, incluindo efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios (GIRARD; AWIKA, 2018).

Flavonoides

Predominantemente presente na camada mais externa do sorgo, os flavonoides são mais encontrados no farelo do cereal. A cor do pericarpo, sua espessura e a presença da testa pigmentada, são responsáveis pela caracterização dos tipos e influenciam nas concentrações desses componentes (DYKES *et al.*, 2011). Representantes da maior classe de compostos fenólicos das plantas, os flavonoides são os mais abundantes e diversos presentes no sorgo. Entre estes compostos, as antocianinas são uma fonte de antioxidantes e pigmentos naturais solúveis em água (ZIA UL HAQ; RIAZ; SAAD, 2016). As antocianinas com maiores destaques entre os cultivares de sorgo são as 3-deoxiantocianidinas (3-DXA), que por sua vez compreendem as luteolinidinas e apigeninidinas, as quais possuem baixa distribuição na natureza (AWIKA; ROONEY; WANISKA, 2004; CARDOSO *et al.*, 2017). A principal característica que diferencia a 3-deoxiantocianidina das demais antocianinas é a ausência de um grupamento hidroxila (-OH) na posição C-3, essa modificação estrutural confere a esse composto propriedades químicas únicas. O sorgo, nesse contexto, é considerado a principal fonte de 3-deoxiantocianidinas para humanos, tal característica pode ser explorada na produção de corantes naturais com potencial antioxidante (XIONG *et al.*, 2019).

Os flavonoides, como flavonas, flavanonas e 3-deoxiantocianidinas, apresentam notável capacidade antioxidante, anti-inflamatória e anticancerígena em estudos *in vitro*. Esses compostos demonstram potencial para reduzir radicais livres e estresse oxidativo, inibir

vias inflamatórias e a produção de citocinas pró-inflamatórias, além de exercerem efeito citotóxico em células cancerígenas (YANG; BROWNING; AWIKA, 2009). Além disso, apresentam propriedades hepatoprotetoras, contribuindo significativamente para a prevenção do câncer de cólon (NYONI *et al.*, 2020). Esses efeitos estão associados à capacidade dos flavonoides de modular vias moleculares envolvidas no estresse oxidativo e na inflamação, fatores relacionados ao desenvolvimento do câncer. No caso específico de neoplasias gastrointestinais, foi observado que os flavonoides inibem a proliferação de células tumorais, sugerindo seu potencial como agentes quimioprotetores (BOUARGALNE *et al.*, 2022). Por outro lado, as antocianinas, embora apresentem menor biodisponibilidade dietética em comparação com as flavonas e flavanonas, continuam sendo objeto de estudo devido à sua relevância na promoção da saúde (TANWAR *et al.*, 2023).

Impactos e benefícios para a saúde humana e nutrição

Atividade antioxidante

Na obesidade e em outras DCNTs o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio no organismo pode levar a efeitos nocivos no organismo como a peroxidação lipídica nas membranas celulares, desnaturação proteica, oxidação e dano ao DNA (HOANG *et al.*, 2019). Neste contexto, o sorgo, comparado aos demais cereais, apresenta uma das maiores capacidades antioxidantes dos cereais e estão relacionadas a suas concentrações de compostos fenólicos, o que o torna um importante aliado na redução do efeito dos reativos de oxigênio (ROS) sobre o organismo (PONTIERI *et al.*, 2021; RAGAEI, ABDEL-AAL; NOAMAN, 2006).

Contribuindo para a atividade antioxidante do sorgo, quando presentes, os taninos influenciam destacadamente a capacidade para

reduzir radicais livres. Diversos estudos reportaram atividade antioxidante superior de alimentos ou extratos elaborados a partir de genótipos de sorgo, principalmente aqueles ricos em taninos condensados no sorgo e por possuírem a maior capacidade de se ligar aos reativos de oxigênio (ROS) sendo um poderoso antioxidante (PALAVECINO *et al.*, 2018; PRASAD *et al.*, 2014; REIS GALLO *et al.*, 2021). Tendo em vista que os taninos condensados não são absorvíveis pelo organismo, reagem com outras macromoléculas formando complexos, esses compostos podem atuar como coletores dos radicais livres, principalmente no trato gastrointestinal contra o estresse oxidativo (TIAN *et al.*, 2011).

Os taninos ainda podem beneficiar a saúde humana ao prevenir distúrbios crônicos, inibindo a produção de óxido nítrico (NO), a ação da sintetase e da xantina oxidase, além de reduzir a inflamação em doenças cardiovasculares. Esses compostos também atuam bloqueando enzimas com ação pró-oxidativa (NAGY *et al.*, 2021). Adicionalmente, KHAN *et al.* (2015) demonstraram que o consumo de macarrão preparado com grãos de sorgo vermelho, em comparação ao produzido com sorgo-branco, que apresenta menor teor de compostos fenólicos, trouxe melhorias significativas à saúde humana devido ao aumento da atividade antioxidante. Além disso, descobriu-se que o macarrão elaborado com farinha de sorgo vermelho ou branco, nas concentrações de 20%, 30% e 40%, apresentou maior conteúdo de ácidos fenólicos ligados, maior teor total de polifenóis e maior capacidade antioxidante em todas as formulações testadas, quando comparado ao macarrão controle (sem adição de sorgo) (KHAN *et al.*, 2013, 2014, 2015). Estudos indicam também que biscoitos enriquecidos com grãos de sorgo ajudam a reduzir o estresse oxidativo e a inflamação, além de favorecer a melhora na resposta glicêmica, sendo uma alternativa adequada para pessoas com obesidade e diabetes (STEFOSKA-NEEDHAM *et al.*, 2016).

Além dos compostos fenólicos de maneira geral, as 3-deoxiantocianidinas do sorgo apresentam significativa relevância no combate

de ROS. Uma vez que, essa classe de antocianinas apresenta forte influência na fase 2 da atividade enzimática, especialmente na enzima NADH quinona oxiredutase (NQO), sendo considerada uma indutora de NQO. Os achados propõem que antocianinas naturais comuns não possuíam a capacidade de induzir a enzima NQO, uma vez que ela demanda a dupla ligação 2,3 nos anéis de carbono dos flavonoides. O sorgo, nesse contexto, apresenta uma diferença importante com as 3-deoxiantocianidinas e, principalmente, os derivados metoxilados desses compostos apresentam capacidade superior de indução da enzima NQO. Entre os tipos de sorgo, aqueles com pericarpo preto são os mais ricos em 3-deoxiantocianidinas (metoxiladas) e, portanto, com maiores efeitos na indução de NQO e consequentemente no combate de ROS (YANG; BROWNING; AWIKA, 2009). KUMARI *et al.* (2021) avaliaram a estabilidade das antocianinas do sorgo em diversos genótipos e encontraram maior estabilidade e potencial para aplicação em alimentos como corantes naturais com potencial efeitos benéficos à saúde.

Atividade anti-inflamatória

A presença contínua e excessiva de fatores que influenciam o estresse oxidativo de longo prazo pode levar a inflamação e consequentemente resultar em diversas doenças crônicas como DM2, doenças cardiovasculares e câncer. Assim, durante a inflamação, diversos compostos pró-inflamatórios como interleucinas (IL), fatores de necrose tumoral (TNF), prostaglandinas, ciclooxigenases (COX) são gerados (SHIM *et al.*, 2013). Nesse contexto, a redução ou atenuação da inflamação por meio da inibição dos marcadores pró-inflamatórios tem sido correlacionada diretamente com a prevenção de doenças. Dessa maneira, vários compostos fenólicos do sorgo têm apresentado destaque por possuírem atividade inibitória na produção desses componentes da inflamação, tanto em estudos *in vitro* como *in vivo* (BURDETTE *et al.*, 2010; HOANG *et al.*, 2019).

Ácidos fenólicos como o gálico e o ferúlico foram associados à inibição da produção COX-2 e TNF- α a partir da avaliação do efeito anti-inflamatório de extratos de farelos de duas variedades de sorgo: preto e sumagre. Os autores discutem ainda que os farelos de sorgo contêm diversos ácidos fenólicos, como ácido gálico, ácido p-hidroxibenzoico, ácido protocatecuico, catequina e vanilina, que demonstram uma rápida absorção pela pele humana. Esses compostos podem ser absorvidos em apenas 30 minutos, sugerindo que fitoquímicos como flavonoides e proantocianidinas possuem o potencial de reduzir a inflamação induzida por acetato de tetradecanoilforbol (TPA) ao serem absorvidos pela pele. Essa característica é relevante, pois muitos medicamentos anti-inflamatórios não esteroides disponíveis no mercado podem causar efeitos colaterais indesejados com o uso contínuo (BURDETTE *et al.*, 2010).

Em outro estudo realizado por Hong *et al.*, (2020) que utilizou células modelos de inflamação de macrófagos, os extratos do sorgo (SC84 e PI570481) foram capazes de inibir a produção de óxido nítrico, interleucina-6 e reativos de oxigênio. Os autores ainda sugeriram que esse poder inibitório está mais associado aos taninos presentes nos extratos dos genótipos estudados. Adicionalmente, Stefoska-Needham e colaboradores (2016) verificaram que a introdução de biscoitos de sorgo flocado na dieta de adultos obesos por mais de 12 semanas resultou na redução significativa de compostos pró-inflamatórios como IL-1 β , IL-6, IL-8 e TNF- α . Esse resultado corrobora a importância e a validade da inserção de sorgo em matrizes alimentares para consumo humano, destacando os impactos positivos em marcadores da inflamação.

Atividade antidiabética, prevenção da obesidade e saciedade

O potencial preventivo do sorgo no DM2, obesidade e saciedade está intrinsecamente ligado à sua composição nutricional única. O sorgo

apresenta relativamente uma baixa digestibilidade dos amidos, tendo em vista que o cereal contém níveis superiores de amido resistente e amido de baixa digestibilidade geral em seu endosperma. Durante certos processamentos de alimentos, como o hidrotérmico, ocorre a formação de diversas ligações cruzadas como as pontes de dissulfeto entre as proteínas do sorgo (kafirinas) e o amido, que limitam sua digestão (BARROS, AWIKA E ROONEY, 2012; PALAVECINO *et al.*, 2018; XIONG *et al.*, 2019). Os taninos, diferentemente dos demais compostos fenólicos, apresentam maior e mais forte capacidade de complexação com amido. A formação desses complexos está positivamente associada ao aumento da saciedade, a redução da ingestão calórica e ainda associada a respostas glicêmicas mais baixas, aspectos esses de extrema relevância para pessoas com DM2 e obesidade (DONG *et al.*, 2011; ZHANG E HAMAKER, 2009).

Relativo ao potencial da atividade antidiabética do sorgo, Links e colaboradores (2015) demonstraram que extratos elaborados a partir de um genótipo de sorgo rico em taninos foram capazes de inibir a atividade de amilases digestivas, como a α -amilase salivar, apresentando poder inibitório da enzima 20.000 maior que a acarbose. Essa atividade inibitória da digestão da glicose contribuiu para redução dos níveis da glicemia sanguínea e pode ser o primeiro passo para o mecanismo antidiabético do sorgo. Kumari *et al.*, (2021) apresentou resultados que reforçam o potencial do sorgo como inibidor de importantes enzimas como a α -glucosidase a partir de estudos com o farelo de sorgo amarelo da variedade IS10972. Em um estudo conduzido por Poquette, Gu & Lee (2014) foram comparados muffins de sorgo com um controle feito de trigo (50g de amido no total). O valor do amido resistente do sorgo (33,5%) foi mais que o dobro do observado no de trigo (15,1%). O consumo dos muffins ainda apresentou influência na glicose e insulina sanguínea, resultando na melhora da resposta glicêmica dos indivíduos.

Diversos estudos demonstraram a atividade antiobesogênica do sorgo, por diversos mecanismos. Os extratos de sorgo apresentaram

uma inibição significativa da diferenciação e do acúmulo de triglicerídeos em células 3T3-L1, efeito que está relacionado à redução da atividade da glicerol-3-fosfato desidrogenase (GPDH) e das enzimas lipase pancreáticas, fundamentais no metabolismo dos lipídios (OFOSU *et al.*, 2020; PARK *et al.*, 2011). Ainda, estudos in vivo com ratos relataram similarmente resultados positivos na redução dos triglicerídeos com dietas contendo sorgo. Ensaios clínicos em humanos investigaram os efeitos do sorgo em parâmetros relacionados à obesidade. Um desses estudos avaliou biscoitos de flocos feitos com sorgo integral em indivíduos saudáveis e constatou que o consumo de sorgo elevou os níveis pós-prandiais de GLP-1 (peptídeo semelhante ao glucagon 1) e GIP (polipeptídeo inibitório gástrico), aumentando a sensação de saciedade em comparação ao tratamento com trigo (STEFOSKA-NEEDHAM *et al.*, 2016). Outro estudo examinou o impacto do sorgo extrusado na antropometria, composição corporal e parâmetros clínicos em homens com sobrepeso, concluindo que seu consumo resultou em perda de peso, redução da circunferência da cintura e diminuição do percentual de gordura corporal (ANUNCIACÃO *et al.*, 2019).

Outro aspecto relevante no sorgo é a presença das fibras dietéticas, amido resistente e o baixo índice glicêmico encontrado em alguns produtos elaborados com sorgo e nas frações do cereal (Anunciação *et al.*, 2018; MORAES *et al.*, 2015, 2018). Alimentos com alto índice glicêmico são responsáveis por picos prolongados e elevados de glicose e estes estão associados ao risco do desenvolvimento do DM2. Ao passo que, alimentos com baixo índice glicêmico possuem carboidratos de digestão lenta que causam elevações menores. Nesse sentido, em uma pesquisa conduzida com adolescentes obesos, RACHMAWATI e colaboradores (2022) a partir da intervenção de 28 dias, consumindo 90g de biscoitos de sorgo, verificaram modificações positivas na glicose de jejum e percentual de gordura corporal para meninos e meninas. Os autores associaram essas modificações positivas principalmente ao conteúdo de fibras e de amido resistente presentes no

sorgo, uma vez que os biscoitos continham baixa caloria, com possível poder mais elevado de saciedade. Ademais, o potencial dos taninos de complexação aos carboidratos e proteínas contribuem para redução da digestibilidade e consequentemente das calorias dos biscoitos.

Outra propriedade do sorgo é a sua capacidade de saciedade. O cereal, por ser integral, de baixa digestibilidade e rico em fibra dietética como o amido resistente, tem o poder de aumentar a saciedade pós consumo alimentar, controlando o retorno da fome para que ocorra de forma gradual e mais lenta, trazendo benefícios como a regulação da taxa de absorção de nutrientes, menor ingestão calórica e prevenindo constipação (Anunciação et al., 2018; REIS GALLO et al., 2021; STEFOSKA-NEEDHAM et al., 2016). Com base nos estudos de Dos Reis Gallo e colaboradores (2021), diferentes tipos de pães de sorgo foram avaliados e comparados com o pão controle e se destacou que todos os pães à base de sorgo apresentaram maior teor de fibras e proteínas e, ainda, uma menor resposta da glicose, denotando o baixo índice glicêmico característico do cereal. Esses fatores quando unidos dão importante destaque para a propriedade de saciedade presente no sorgo.

O potencial na redução do impacto na glicemia do sorgo também foi relatado por Anunciação e colaboradores (2018) em um estudo com bebidas de sorgo de 3 diferentes genótipos e um controle não sorgo: SC319 (rico em proantocianidinas e 3-DXA); BDLO357 (rico em 3-DXA, sem proantocianidinas) e SC391 (baixo em 3-DXA e sem proantocianidinas). Comparado a bebida sem sorgo, todas as bebidas de sorgo obtiveram respostas glicêmicas mais baixas, além disso o consumo das bebidas de sorgo antes da glicose resultou em uma área abaixo da curva pós-prandial menor que o controle sem sorgo. Os autores associaram esses resultados aos teores de 3-DXAs, proantocianidinas, fibras e amido total e resistente, principalmente da bebida feita com o genótipo SC319. Entretanto, ressaltaram que de forma geral, os fenólicos do sorgo podem contribuir na melhora de alterações glicêmicas através da modulação da absorção de carboidratos.

Dessa forma, a utilização do sorgo para elaboração de alimentos com menores IG pode ser uma estratégia viável na redução do risco de desenvolvimento de DM2 e prevenção da obesidade.

Potencial do sorgo para dietas isentas de glúten

Um importante atributo do sorgo é a ausência da proteína formadora de glúten em sua composição, sendo assim um cereal livre de glúten. Para os indivíduos acometidos pela doença celíaca ou pela intolerância não celíaca ao glúten, o principal tratamento baseia-se na dieta isenta de glúten, que vai atuar revertendo sintomas e evitando complicações. Entretanto, a dieta celíaca se caracteriza por ser desafiadora ao tornar a alimentação muito limitada, sendo imprescindível para o portador de doença celíaca o consumo apenas de alimentos isentos de glúten, os quais existem em quantidade e variedade reduzida (DIONISI *et al.*, 2024). Nesse cenário, o sorgo se torna um forte alimento aliado por fornecer atributos nutritivos e sensoriais e auxiliar na diversificação da dieta para esse grupo populacional em detrimento da indústria de alimentos deficitária em produtos sem glúten.

Uma grande vantagem do sorgo é a sua versatilidade, podendo ser utilizado de diversas formas quando processado. Sendo assim, além de ser um alimento sem glúten diferenciado dos demais comercializados, o sorgo pode ser incluído não apenas no formato de farinha para produção de panificados e massas, mas também cozido para composição de saladas e em farelo para ser adicionado a preparações como vitaminas, iogurtes, snacks, doces e, ainda, produtos cárneos (Embrapa, 2021). Paiva, Queiroz e Garcia (2019) comprovaram por meio de pesquisas com análise sensorial, a aceitação positiva de macarrão à base de sorgo pelo público celíaco, evidenciando a possibilidade de produção de alimentos sem glúten saudáveis, nutritivos e muito apreciados sensorialmente por potenciais consumidores.

Sorgo: uma inovação para a alimentação humana

Características únicas para formulações alimentares modernas e inovadoras

Apesar de todos os benefícios destacados neste capítulo, o sorgo permanece num patamar inferior ao seu potencial para a alimentação humana (QUEIROZ *et al.*, 2011). Nesse contexto, pesquisadores têm destinado seus esforços para o estudo de aplicações inovadoras do sorgo num contexto em que a demanda por novos produtos com boa qualidade nutricional é crescente. O sorgo pode ser considerado uma matéria-prima inovadora uma vez que frente a um mercado de monoculturas com baixa diversidade de produção, pode ser aplicado na solução de diversos problemas atuais da produção agrícola e na alimentação humana para desafiar as soluções convencionais. Uma associação simbiótica com potencial transformador para problemas que continuamente demandam esforços (MCGINNIS; WEBSTER, 2024).

Como exemplo, na pesquisa e indústria, o sorgo tem sido aplicado no desenvolvimento de xaropes adoçantes. Em comparação com adoçantes tradicionais como mel e xarope de bordo, apresenta menor doçura, com nuances de acidez e um leve toque amargo. Diferentemente da sacarose, o xarope de sorgo, chamado de “adoçante longo”, possui um perfil de sabor mais complexo devido ao seu alto conteúdo de nutrientes e antioxidantes, além de conter menos sacarose (RATNAVATHI E CHAVAN, 2016; SINGH *et al.*, 2020). Entre suas características, destacam-se maior salinidade e amargor, uma composição mais rica de compostos voláteis aromáticos, maior teor de fenólicos totais e elevada capacidade antioxidante em relação ao açúcar de cana (ASIKIN *et al.*, 2018). Um estudo conduzido por Eggleston *et al.* (2021) também identificou níveis significativamente mais altos de fenólicos totais e maior atividade antioxidante nos xaropes de sorgo em comparação a outros adoçantes comuns, como xarope de milho rico em frutose, mel, xarope de bordo, agave e xarope de arroz, destacam-se

por oferecer um duplo benefício: um sabor mais complexo e agradável em produtos alimentícios, aliado a um maior potencial para benefícios à saúde, devido ao seu elevado teor de nutrientes e antioxidantes.

Na produção de bebidas alcoólicas, os álcoois produzidos a partir do sorgo possuem um sabor único e complexo, resultado das populações de microrganismos naturalmente presentes nesse grão, que diferem das encontradas nos grãos comumente utilizados na fabricação de bebidas alcoólicas (Liu *et al.*, 2021). O sorgo também pode adicionar profundidade e complexidade de sabor à crescente categoria de coquetéis com baixo ou nenhum teor alcoólico. Tireki (2021) aponta que os consumidores estão substituindo formulações com alto teor de açúcar por opções que incluem ingredientes funcionais, oferecendo benefícios à saúde e propriedades medicinais, como a melhora da função cerebral e do sono. No entanto, um dos principais desafios para utilizar bebidas como veículo de ingredientes funcionais é a criação de emulsões estáveis que preservem esses compostos durante o processamento e a embalagem.

O sorgo apresenta grande potencial na elaboração de embalagens biodegradáveis para alimentos e especialmente nas embalagens comestíveis derivadas de amido. Sari *et al.* (2023) elaborou um bioplástico à base de sorgo e carragenina por meio do método de fundição em solução, utilizando sorbitol como plastificante. Carvalho *et al.* (2024) apresentou o desenvolvimento de um filme à base de sorgo e glicerol como plastificante e obteve um material à base de amido de sorgo que foram considerados homogêneos e quase amorfos. A caracterização dos filmes de amido de sorgo indicou seu potencial para aplicação na embalagem de vegetais, especialmente devido à sua alta permeabilidade ao vapor de água. Além disso, esses filmes também apresentam possibilidades de uso em outras áreas, como na indústria farmacêutica. Dessa forma, o amido de sorgo destaca-se como uma fonte promissora para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis, com um potencial significativo para utilização em embalagens de alimentos.

Um sorgo ceroso branco, sem taninos, desenvolvido pela Texas A&M AgriLife Research, no Texas, EUA, e cultivado na África do Sul, mostrou potencial para reproduzir uma textura semelhante à do trigo, com resultados positivos em testes realizados com pães fermentados (MEZGEBE; ABEGAZ; TAYLOR, 2018). Além disso, variedades de sorgo foram melhoradas para aumentar a digestibilidade das proteínas. Especificamente, tipos de sorgo ceroso com alta digestibilidade proteica demonstraram elevada solubilidade e viscosidade de pasta, características similares às das farinhas de trigo usadas na produção de pães comerciais (ELHASSAN *et al.*, 2015). Os efeitos antioxidantes do sorgo também podem beneficiar outros produtos. No caso do pão de trigo, a reação de Maillard, que confere uma coloração marrom ao produto, pode gerar compostos nocivos, como a acrilamida. A incorporação de 1,5% de extrato de farelo de sorgo ao pão pode reduzir os níveis de acrilamida em até 70% (XIONG *et al.*, 2024).

O desenvolvimento de produtos baseados na inovação parte da demanda de mercado por novos materiais, produtos, tecnologias e da necessidade dos consumidores por produtos de origem vegetal e apresentem qualidade nutricional, tecnológica e sensorial (TEFERRA; AWIKA, 2019). O mercado para a elaboração de produtos alimentícios deve estar alinhado com as tecnologias e pesquisas emergentes, com enfoque em inovações sustentáveis que exigem alternativas que fogem às alternativas conhecidas. Dessa forma, o potencial do cereal para manipulação genética permite o desenvolvimento de genótipos com características específicas para as demandas de uma população como o provimento de vitaminas deficitárias como estratégia para o enfrentamento da má nutrição e o acréscimo de compostos com capacidade antioxidante como aliado na prevenção de doenças (ARE *et al.*, 2020). Ainda nessa perspectiva, os fitoquímicos do sorgo apresentam grande apelo tecnológico ao passo que, os taninos desse cereal contribuíram no retardamento da oxidação lipídica de produtos cárneos (TEFERRA; AWIKA, 2019). Com um perfil vasto de cores que culmina em uma diversidade também de compostos fenólicos,

os grãos de sorgo ainda apresentam possibilidades no mercado de corantes naturais e de aditivos naturais em alimentos, contribuindo para a diversificação das matrizes e substituição do uso extensivo de outros corantes e aditivos sintéticos (AWIKA, 2017).

Desafios do processamento do sorgo para alimentação humana

Tecnologias de processamento e para tratamento térmico aplicados ao sorgo

O estudo das tecnologias de processamento do sorgo faz-se importante ao considerar o impacto que estes processamentos podem gerar no perfil nutricional e de compostos bioativos do sorgo. Diversos autores abordam metodologias de processamento do sorgo como a extrusão, tratamentos térmicos com calor seco e úmido (comum ou sob pressão), fermentação, decorticação, nixtamalização, moagem malte, imersão, irradiação, entre outros (AGUIAR *et al.*, 2023; LUZARDO-OCAMPO *et al.*, 2020). O processamento do sorgo é considerado um pré-requisito para a produção e para o consumo de produtos elaborados a partir do cereal. Estudos evidenciaram que a aplicação de pré-processamentos pode impactar significativamente a estrutura física, no conteúdo de compostos bioativos e nas características tecnológicas da matéria-prima (CARDOSO *et al.*, 2014; MORAES *et al.*, 2020; QUEIROZ *et al.*, 2020; RASHWAN *et al.*, 2021).

Um dos métodos mais utilizados no processamento dos grãos é o térmico. Este pode ser úmido, seco, a vapor, por assamento e torrefação, e até mesmo em micro-ondas (XIONG *et al.*, 2019). Como todos os tipos de processamento podem implicar benefícios e desafios advindos de seu uso, a realização de alguns métodos de tratamento térmico, como a cocção úmida, compostos bioativos como os taninos podem complexar-se com as proteínas reduzindo sua digestibilidade

(BARROS; AWIKA; ROONEY, 2012; LINKS *et al.*, 2015; TAYLOR *et al.*, 2007). Por outro lado, o processamento da farinha de sorgo sob calor seco em forno à 95°C por 20 minutos ou a 121 °C por 30 minutos pode gerar a despolimerização dos taninos no sorgo, contribuindo para que estes compostos fenólicos se tornem mais biodisponíveis (CARDOSO *et al.*, 2014).

Após o resfriamento dos grãos, parte do amido torna-se amido resistente o que leva a uma possível formação de complexos entre o amido e as kafirinas, reduzindo assim a capacidade ofensiva das enzimas digestivas. A liberação de compostos como os ácidos fenólicos podem ser substancialmente melhoradas através de processamentos como a fermentação e cocção, o que resulta em uma maior biodisponibilidade (CARDOSO *et al.*, 2014; CROZIER; RIO DEL; CLIFFORD, 2010). Esses estudos ainda demonstraram que a aplicação de cocção úmida sob pressão pode apresentar melhores resultados na manutenção de compostos bioativos e fenólicos, bem como, maior atividade antioxidante (BIANCO-GOMES *et al.*, 2022; HITHAMANI; SRINIVASAN, 2014).

Cardoso e colaboradores (2014) avaliaram o efeito do calor seco e do calor úmido no perfil de antioxidantes do sorgo (genótipo BRS 310), concluíram que o calor seco não reduziu o teor de 3-deoxiantocianidinas, compostos fenólicos totais e atividade antioxidante, aumentando ainda o teor de vitamina E. Por outro lado, o calor úmido diminuiu o conteúdo de 3-deoxiantocianidinas, compostos fenólicos, vitamina e, atividade antioxidante e aumentou o teor de carotenoides. Em um estudo conduzido por Moraes *et al.* (2020) em que se avaliou o efeito de processamentos domésticos em 7 genótipos de grão de sorgo (cru, aquecido e pipoca) foi encontrado que a pipoca de sorgo teve sua capacidade antioxidante reduzida e o grão aquecido a manteve. De igual modo, o perfil de taninos reduziu em todos os genótipos quando o sorgo foi estourado em pipoca. O conteúdo de fenólicos do sorgo aquecido, por sua vez, foi maior que o do cru nos genótipos BRS 310, BRS 305, BR 501 e BR 700. A transformação

do sorgo em pipoca afetou o teor de fenólicos totais principalmente em BRS 305 e BR 700.

Outro tipo de processamento muito utilizado no desenvolvimento de produtos e preparo de farinhas, incluindo o sorgo, é a extrusão. A extrusão é um processo de cozimento que combina diversos fatores como: velocidade de rotação, cisalhamento mecânico, umidade, pressão e temperatura. Este processo favorece inúmeras reações químicas e alterações na matriz alimentar, como inativação enzimática e de microrganismos, desnaturação de proteínas, gelatinização do amido e liberação de compostos fenólicos complexos (MORENO *et al.*, 2018). Esse tipo de processo é costumeiramente utilizado para modificação de características das matérias-primas, favorecendo e melhorando o aspecto dos produtos finais, principalmente em aspectos como sabor, palatabilidade e rendimento. Muito utilizado na produção de comida instantânea desidratada, cereais matinais, bebidas e produtos panificados o método de extrusão destaca-se pelo seu potencial funcional e tecnológico, mas também por ampliar as possibilidades de trabalhar com o sorgo e torná-lo um cereal acessível à alimentação da população (AGUIAR *et al.*, 2023; TOLEDO *et al.*, 2020). Benhur *et al.*, 2015 desenvolveram um macarrão elaborado a partir da extrusão das farinhas de sorgo e trigo. Os autores concluíram que o desenvolvimento de alimentos prontos para o consumo a partir da extrusão podem ser elaborados com qualidades tecnológicas e sensoriais adequadas com as demandas dos consumidores. Em outro estudo com desenvolvimento de cereais matinais de sorgo e de trigo, Anunciação *et al.* 2017, encontrou maior aceitação para o cereal desenvolvido com sorgo, além de melhores características relativas à sua qualidade nutricional.

O efeito do tratamento térmico sobre uma farinha de sorgo utilizada na produção de pães e bolos sem glúten foi estudado por Marton, Khouryieh, & Aramouni (2016). Os autores encontraram que o tratamento térmico em forno de convecção (95 °C e 125 °C; 15, 30 e 45 min) resultou em características positivas para ambos os produtos

elaborados. Com o tratamento, foi obtido um maior volume e número de células por área do bolo e pão, além da aceitabilidade que também foi maior para aqueles elaborados com farinha com tratamento térmico. Os mecanismos pelos quais se obtiveram melhores qualidades no bolo e no pão através do processamento das farinhas não são totalmente compreendidos, mas podem ser atribuídos à viscosidade aumentada do sorgo, potencializando o inchaço e a gelatinização do amido.

Embora os avanços no uso do sorgo sejam promissores, ainda há necessidade de estudos que avaliem diferentes combinações de tempo, temperatura, proporção entre água e grãos e tempo de cozimento, além de explorar o perfil nutricional e bioativo do cereal e seus efeitos nas características tecnológicas e sensoriais dos produtos (AGUIAR *et al.*, 2023). Cada espécie de sorgo pode apresentar vantagens distintas quando submetida a tratamentos térmicos específicos, resultando em melhorias nos atributos sensoriais e na qualidade nutricional (KHODDAMI *et al.*, 2023). Assim, é fundamental compreender as interações entre os genótipos, os métodos de processamento aplicados e as preferências do público-alvo, de modo a otimizar a obtenção de produtos com características desejadas (BATARIUC; UNGUREANU-IUGA; MIRONEASA, 2021). Embora os métodos de processamento ampliem as possibilidades de uso do sorgo na alimentação humana, ainda é necessário aprofundar as pesquisas sobre aspectos como aceitação sensorial, diversidade de genótipos estudados e impacto dos tratamentos térmicos nas características nutricionais e tecnológicas, para garantir a elaboração de produtos com maior qualidade e aceitabilidade pelos consumidores (AGUIAR *et al.*, 2023).

Formulação de alimentos à base de sorgo

Para Khoddami *et al.* (2023), a principal razão pela qual os produtos alimentícios à base de sorgo não são tão populares globalmente em comparação com os produtos feitos de outros grãos é a percepção de

que possuem qualidades sensoriais inferiores. Entretanto, para além da qualidade sensorial do produto final é preciso, conforme reportado por de Oliveira *et al.* (2022), a escolha acertada do tipo de sorgo utilizado para cada receita, dada a variedade de cores e composições, o cereal apresenta uma gama de possibilidades para que o produto final apresente características finais mais próximas às desejadas.

A exemplo, no desenvolvimento de pães sem impacto da cor, o sorgo-branco pode ser aplicado como substituto ou adicional às farinhas de arroz, trigo ou qualquer outra. Na elaboração de bolos como os de chocolate ou em que a cor seja desejada, os sorgos com pericarpo marrom, vermelho ou preto podem ser utilizados. A variedade permite que os alimentos possam ser elaborados com vistas a atingir um produto que atenda a demanda do consumidor e que esteja alinhado aos atributos sensoriais de interesse (AGUIAR *et al.*, 2023; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Além do uso da temperatura para uma melhora do grão de sorgo, outros alimentos podem ser incorporados às formulações potencializando os benefícios deste cereal. Surahman *et al.* (2021) estabeleceram uma formulação para um produto alimentar complementar instantâneo destinado a bebês, incorporando 12,25% de farinha de sorgo vermelho e 5,75% de mamão. Foi demonstrado que esta formulação atende adequadamente aos requisitos relativos ao teor de gordura, fibras e concentrações de beta-caroteno. Ainda, um estudo indicou que a inclusão de 30% de farinha de amendoim na farinha de sorgo diminui os níveis de fatores antinutricionais, como fitato e tanino, no produto resultante. Além disso, a concentração de micronutrientes no produto, incluindo cálcio, ferro, zinco, magnésio e potássio, aumentou significativamente com o aumento da proporção de farinha de amendoim (DOL; MAHDI; MOHAMED, 2023).

Aplicações do sorgo na indústria alimentícia

Desenvolvimento de panificados

O sorgo tem ganhado espaço no mercado, principalmente relacionados a lanches, como panificados, biscoitos, cereais e bebidas quentes. Contudo, para haver um maior crescimento na produção e criação de novos alimentos requer uma equipe com múltiplo conhecimento, desde produtores do grão até o marketing, para ser feito todo um trabalho voltado para chamar atenção do consumidor (STEFOSKA-NEEDHAM; TAPSELL, 2020).

Cayres *et al.* (2020), ao desenvolverem um bolo com 87,7% de sorgo vermelho integral, apontaram que o cereal pode ser utilizado como ingrediente principal na elaboração de bolos sem glúten, sendo que a otimização tecnológica da formulação de pré-misturas à base de sorgo e outras farinhas em menor quantidade trouxe uma melhoria nas propriedades sensoriais. Os autores destacam que os consumidores brasileiros afirmaram não ter conhecimento sobre o sorgo, o que indica que seu uso possui potencial para ser introduzido como uma novidade no mercado.

Outro tipo de produto que se beneficia da aplicação de sorgo são os biscoitos, geralmente reconhecido pela crocância, o biscoito é um tipo de alimento altamente consumido no mundo e no Brasil, que possuem uma matriz alimentar pouco dependente de glúten. Nesse contexto, Queiroz *et al.* (2022) elaboraram biscoitos sem glúten de feijão caupí e sorgo. Os autores concluíram que a adição de farelo de sorgo com pericarpo branco (sem taninos) e farelo com pericarpo preto (com taninos) em biscoitos sem glúten feitos à base de arroz aumentou os teores de compostos fenólicos totais e a capacidade antioxidante dos produtos. Em outro estudo, Yu *et al.* (2020) desenvolveram biscoitos contendo farinha de trigo (FT) enriquecida com farinha de sorgo integral e farinha de sorgo extrusada (FSE). A utilização de 80% de FSE em combinação com FT mostrou-se eficaz

para aumentar o teor de amido resistente desses produtos, além de apresentar uma aceitação sensorial superior à da amostra controle, preparada com 100% de FT.

Massas

Em relação a produtos como macarrão e massas frescas, diversos estudos apontaram a utilização de sorgo como principal cereal utilizado e com sucesso na sua aplicação. Oliveira *et al.* (2022) desenvolveram um macarrão com 24,4% farinha de sorgo, 12,2% amido de batata e concluiu que a utilização de sorgo marrom apresentou diversas vantagens nutricionais ao produto, mas com algumas restrições sensoriais atribuídas aos taninos. Por outro lado, os autores destacam que o sorgo vermelho se mostrou uma excelente variedade, uma vez que apresenta quantidade intermediária de antioxidantes que contribuem para a qualidade funcional do produto e ainda obteve aceitação similar ao macarrão elaborado com sorgo-branco comercial.

Ainda, Prasad *et al.* (2014) destacaram em seu estudo com diversos tipos de alimento à base de sorgo que o macarrão elaborado com o cereal apresenta um dos menores índices glicêmicos entre os tipos de alimento destacados no estudo, em comparação aos pares feitos de trigo. De acordo com Johnson *et al.* (2021), foi possível utilizar até 75% de farinha de sorgo preto combinada com farinha de trigo na produção de macarrão, resultando em uma melhora na qualidade nutricional, com aumento no teor total de polifenóis e maior capacidade antioxidante. Além disso, a aceitação sensorial do produto foi comparável à da amostra padrão feita com 100% de farinha de trigo.

Aplicações em bebidas e fermentados à base de sorgo

A funcionalidade que o sorgo traz para a indústria de alimentos é diversa. Além da produção de biscoitos, bolos, massas e mingau. A

produção de bebidas à base de sorgo também é uma forma de entrega de produtos à população.

Nesta aplicação, uma abordagem eficaz envolve a integração de processos duplos, como maltagem e fermentação. Um estudo de pesquisa examinou a composição de bebidas à base de sorgo maltado submetidas a diferentes durações e temperaturas de fermentação (KIPTANUI *et al.*, 2022). Os autores concluíram que os resultados nutricionais ideais para o desenvolvimento de bebidas foram alcançados por meio de quatro dias de maltagem a uma temperatura de fermentação de 25 °C durante uma semana. Outra investigação demonstrou os aumentos de vitamina C e ferro, juntamente com a elevação do conteúdo de taninos e fenólicos à medida que a duração da fermentação se estendia (BWAMU *et al.*, 2022). A implementação de culturas de leveduras tem o potencial de refinar o processo de fermentação em termos de eficiência temporal. Assim, Mukisa, Ntaate e Byakika (2017) analisaram o enturire, uma bebida fermentada de mel e sorgo, com e sem a incorporação da cultura de leveduras, revelando maior eficácia na produção de bebidas ao utilizar a cultura, que resultou em maior aceitação (MUKISA; NTAATE; BYAKIKA, 2017).

Em outro exemplo, Anunciação *et al.* (2018) desenvolveram uma bebida adicionada de sorgo extrusado e encontraram resultados satisfatórios na redução do impacto glicêmico pós-prandial comparado a bebida sem sorgo. Ainda, Queiroz *et al.* (2018) elaboraram uma bebida de baixa caloria também com sorgo extrusado. Os resultados apontaram que o preparado em pó para bebidas foi aceito para as características analisadas e que o sorgo com taninos obteve maior aceitação para sabor e aceitação geral.

Aplicação em derivados lácteos

Correia *et al.* (2022) utilizaram farinha de sorgo no desenvolvimento de cream cheese. A adição de sorgo com taninos promoveu maior concentração de proteínas, taninos condensados e capacidade

antioxidante, além de conferir ao creme coloração rosada e mais firmeza. Sensorialmente, todos os produtos elaborados obtiveram aceitação satisfatória (>70%) com notas da aceitação global variando entre 7,0 a 7,65. Os autores apontam que a análise sensorial obteve influência direta da adição do sorgo, destacando a cor e textura. Além disso, apontam a relevância da aplicação do sorgo como farinha nesse tipo de produto, uma vez que não demanda a utilização de processos mais caros como a extrusão e é benéfico para a aceitação do produto.

No iogurte grego, Oliveira *et al.* (2020) ressaltam que a adição de farinhas integrais de sorgo, especialmente do genótipo BRS 305, contribuiu para melhorar as propriedades antioxidantes das formulações desenvolvidas. No entanto, sugere que a maior concentração de taninos condensados pode ter influenciado negativamente a aceitação sensorial e a intenção de compra dessas formulações. Por outro lado, a semelhança na análise sensorial do iogurte contendo a farinha integral de sorgo do genótipo BR 501 em relação ao controle reforça um cenário positivo para a inclusão do sorgo na alimentação humana, utilizando produtos lácteos como matrizes adequadas e agregando potencial funcionalidade a esses alimentos.

Produtos cárneos

Em um estudo conduzido por Prado *et al.* (2019) com bifes de hambúrguer, a proteína isolada de soja usualmente adicionada na elaboração dos bifes foi substituída pela adição de farinha integral de sorgo BRS 501 e BRS 305. Os autores concluíram que a substituição não causou nenhuma grande alteração nos bifes, apenas para cor, uma vez que a cor do pericarpo influencia este fator. Apesar dos bifes com a proteína isolada de soja terem obtido teor superior de proteínas e cinzas, aqueles com farinha de sorgo foram sensorialmente mais aceitos e obtiveram maiores teores de lipídios, compostos fenólicos, taninos condensados e consequentemente maior atividade antioxidante. O estudo conclui que a adição de farinha de sorgo em

produtos cárneos pode ser aplicada com benefícios para o consumidor, sem perda de características de qualidades importantes para sua aceitação sensorial, além de garantir a melhora da qualidade funcional do produto elaborado.

Perspectivas e oportunidades para o Sorgo na alimentação humana

Diferente de outros locais no mundo como África e Ásia, o sorgo não está culturalmente inserido na alimentação brasileira (QUEIROZ *et al.*, 2021). Além disso, questões relativas à aceitação sensorial e ausência de produtos no mercado à disposição dos consumidores é um entrave na disseminação do cereal no país. É justamente nessa direção que governo, universidades, comunidades acadêmicas, setor privado, *stakeholders*, indústrias de alimentos e profissionais da área devem caminhar. Promovendo a ampliação do plantio de sorgo para consumo humano, desenvolvendo novos produtos, investindo em estudos de qualidade e avaliação sensorial, além de incentivos governamentais (PEREIRA; HAWKES, 2022).

Em 2019, o governo da África do Sul reconheceu o sorgo como um cereal estratégico e, em parceria com o Departamento de Ciência e Tecnologia, desenvolveu um plano para investigar o impacto do cereal e identificar os principais obstáculos ao seu mercado. O objetivo principal era analisar como o governo poderia apoiar a indústria alimentícia no fortalecimento do uso do sorgo na produção de alimentos no país. Uma das estratégias propostas para aumentar a presença do sorgo na alimentação local é observar as experiências de países onde o consumo do cereal é mais consolidado ou onde as pesquisas avançaram significativamente. Pesquisadores destacam que o mundo vive um momento oportuno para que *stakeholders* interessados em diversificação alimentar intensifiquem investimentos na

pesquisa e no desenvolvimento de uma cadeia de valor sólida para o sorgo no mercado global de alimentos (PEREIRA; HAWKES, 2022).

Os esforços de pesquisa que exploram os benefícios específicos dos diferentes perfis bioativos do sorgo para a saúde humana são fundamentais para que o cereal alcance seu potencial no setor alimentício. Inovações nas áreas de genética e processamento de alimentos são particularmente necessárias para aprimorar a funcionalidade, a aceitabilidade sensorial e a durabilidade dos produtos à base de sorgo. Além disso, é essencial direcionar os resultados dessas pesquisas para agências governamentais responsáveis pela saúde pública, para influenciar políticas que incentivem o consumo de sorgo e promovam escolhas alimentares mais saudáveis para a população.

A incorporação do sorgo em uma variedade de produtos alimentícios, especialmente em alimentos básicos de países em desenvolvimento onde o cereal apresenta vantagem comparativa, é uma estratégia eficaz para melhorar o valor nutricional dos produtos e contribuir para a prevenção de DCNTs, como o DM2. Além disso, os desenvolvedores de alimentos devem priorizar ingredientes que ofereçam benefícios funcionais amplamente reconhecidos, sejam versáteis em aplicações e apresentem sabor atrativo (KHODDAMI *et al.*, 2023). Diante dos benefícios à saúde do sorgo, apoiados por evidências científicas, é fundamental integrá-lo em formulações de alimentos e bebidas que atendam à demanda crescente por produtos funcionais, promovendo tanto a saúde quanto a inovação no mercado alimentício (QUEIROZ *et al.*, 2021).

Segundo Stefoska-Needham & Tapsel (2020) a comercialização de alimentos à base de sorgo para consumidores não tradicionais em países ocidentais é considerada a abordagem mais desafiadora. Para aumentar a conscientização sobre o sorgo, é fundamental compreender as limitações da cadeia de suprimentos e os motivos por trás da falta de colaboração entre os principais envolvidos, como pesquisadores, fabricantes de alimentos, profissionais de marketing, agências governamentais, nutricionistas e consumidores. Iniciativas globais

têm avançado no desenvolvimento de produtos alimentícios funcionais à base de sorgo, explorando sua versatilidade em farinhas, pães, bebidas e outros alimentos. Paralelamente, esforços em melhoramento genético, adaptação climática e inovação no processamento têm ampliado sua relevância tanto para consumidores tradicionais quanto para novos mercados (KHODAMMI *et al.*, 2023).

Assim, o sorgo surge como uma alternativa promissora para atender às demandas de sistemas alimentares diversificados, reforçando a necessidade de investimentos em pesquisa, políticas públicas e parcerias interdisciplinares para maximizar seu impacto na saúde humana, na segurança alimentar e na sustentabilidade agrícola global (KHODDAMI *et al.*, 2023; MCGINNIS; WEBSTER, 2024; TANWAR *et al.*, 2023).

Referências

- ANUNCIACÃO, P. C. *et al.* Comparing sorghum and wheat whole grain breakfast cereals: sensorial acceptance and bioactive compound content. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 221, p. 984-989, 2017.
- ANUNCIACÃO, P. C. *et al.* Consumption of a drink containing extruded sorghum reduces glycaemic response of the subsequent meal. **European Journal of Nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 251-257, 2018.
- ANUNCIACÃO, P. C. *et al.* Extruded sorghum consumption associated with a caloric restricted diet reduces body fat in overweight men: a randomized controlled trial. **Food Research International**, [s. l.], v. 119, p. 693-700, maio 2019.
- ARE, A. K. *et al.* Genetic enhancement perspectives and prospects for grain nutrients density. In: **Sorghum in the 21st century: food – fodder – feed – fuel for a rapidly changing world**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 791-808.

- ASIKIN, Y. *et al.* Compositions, taste characteristics, volatile profiles, and antioxidant activities of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) syrups. **Journal of Food Measurement and Characterization**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 884-891, 11 jun. 2018.
- AWIKA, J. M. Sorghum: its unique nutritional and health-promoting attributes. *In: Gluten-free ancient grains*. [S. l.]: Elsevier, 2017. p. 21-54.
- AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D. Properties of 3-deoxyanthocyanins from sorghum. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 52, n. 14, p. 4388-4394, 1 jul. 2004.
- BARROS, F.; AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W. Interaction of tannins and other sorghum phenolic compounds with starch and effects on in vitro starch digestibility. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 60, n. 46, p. 11609-11617, 21 nov. 2012.
- BATARIUC, A.; UNGUREANU-IUGA, M.; MIRONEASA, S. Effects of dry heat treatment and milling on sorghum chemical composition, functional and molecular characteristics. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 24, p. 11881, 14 dez. 2021.
- BENHUR, D. R. *et al.* Development and standardization of sorghum pasta using extrusion technology. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 6828-6833, 2015.
- BIANCO-GOMES, A. C. *et al.* Dry heat and pressure favor bioactive compounds preservation and peptides formation in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Current Research in Food Science**, [s. l.], v. 5, p. 117-124, 2022.
- BOUARGALNE, Y. *et al.* Genetic diversity for agromorphological traits, phytochemical profile, and antioxidant activity in Moroccan sorghum ecotypes. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 5895, 7 abr. 2022.

- BURDETTE, A. *et al.* Anti-inflammatory activity of select sorghum (*Sorghum bicolor*) brans. **Journal of Medicinal Food**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 879-887, ago. 2010.
- CARDOSO, L. de M. *et al.* Effects of processing with dry heat and wet heat on the antioxidant profile of sorghum. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 152, p. 210-217, jun. 2014.
- CARDOSO, L. de M. *et al.* Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 372-390, 2017.
- CARVALHO, A. P. A. de *et al.* Sorghum starch: extraction, characterization and film development. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 39, p. 109020, jun. 2024.
- CAYRES, C. A. *et al.* Consumers' acceptance of optimized gluten-free sorghum-based cakes and their drivers of liking and disliking. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 93, 2020.
- CHADALAVADA, K.; KUMARI, B. D. R.; KUMAR, T. S. Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. **Planta**, [s. l.], v. 253, n. 5, p. 113, 29 maio 2021.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Nova estimativa da Conab para safra de grãos 2024/25 é de 322,53 milhões de toneladas**. Brasília, DF: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 19 jan. 2025.
- CROZIER, A.; DEL RIO, D.; CLIFFORD, M. N. Bioavailability of dietary flavonoids and phenolic compounds. **Molecular Aspects of Medicine**, [s. l.], dez. 2010.
- CURTI, M. I. *et al.* Effect of sorghum flour properties on gluten-free sponge cake. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], 2021.
- DIONISI, T. *et al.* Sorghum (*Sorghum vulgare*): an ancient grain, a novel choice for a healthy gluten-free diet. **Minerva Gastroenterology**, [s. l.], v. 70, n. 2, maio 2024.

- DOL, M.; MAHDI, S.; MOHAMED, H. **Development of complementary food from sorghum blended with peanut**. [S. l.]: [s. n.], 15 dez. 2023.
- DONG, J.-Y. *et al.* Dietary glycaemic index and glycaemic load in relation to the risk of type 2 diabetes: a meta-analysis of prospective cohort studies. **British Journal of Nutrition**, [s. l.], v. 106, n. 11, p. 1649-1654, 14 dez. 2011.
- DYKES, L. *et al.* Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 128, n. 1, p. 173-179, 2011.
- EGGLESTON, G. *et al.* Phenolic contents, antioxidant potential and associated colour in sweet sorghum syrups compared to other commercial syrup sweeteners. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 101, n. 2, p. 613-623, 30 jan. 2021.
- ELHASSAN, M. S. M. *et al.* Novel biofortified sorghum lines with combined waxy (high amylopectin) starch and high protein digestibility traits: effects on endosperm and flour properties. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 65, p. 132-139, set. 2015.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção de sorgo no Brasil sobe mais de 36% em apenas uma safra**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.Embrapa.br>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Food and agriculture data: production: crops**. [S. l.]: FAO, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- GIRARD, A. L.; AWIKA, J. M. Sorghum polyphenols and other bioactive components as functional and health promoting food ingredients. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 84, p. 112-124, 2018.
- HITHAMANI, G.; SRINIVASAN, K. Bioaccessibility of polyphenols from wheat (*Triticum aestivum*), sorghum (*Sorghum bicolor*), green gram (*Vigna radiata*), and chickpea (*Cicer arietinum*) as influenced by domestic food processing. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 62, n. 46, p. 11170-11179, 19 nov. 2014.

- HOANG, T. V. *et al.* Heat stress transcription factor OsSPL7 plays a critical role in reactive oxygen species balance and stress responses in rice. **Plant Science**, [s. l], v. 289, p. 110273, dez. 2019.
- HONG, S. *et al.* A comparative study on phenolic content, antioxidant activity and anti-inflammatory capacity of aqueous and ethanolic extracts of sorghum in lipopolysaccharide-induced raw 264.7 macrophages. **Antioxidants**, [s. l], v. 9, n. 12, p. 1-20, 1 dez. 2020.
- HOSSAIN, M. S. *et al.* Sorghum: a prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l], 1 jun. 2022.
- HOU, J. *et al.* Sorghum-waste-derived high-surface area KOH-activated porous carbon for highly efficient methylene blue and Pb(II) removal. **ACS Omega**, [s. l], v. 5, n. 23, p. 13548-13556, 16 jun. 2020.
- HU, Y. *et al.* Intake of whole grain foods and risk of type 2 diabetes: results from three prospective cohort studies. **BMJ**, [s. l], p. m2206, 8 jul. 2020.
- JIANG, Y. *et al.* Structural characterization and antioxidant activity of condensed tannins fractionated from sorghum grain. **Journal of Cereal Science**, [s. l], v. 92, p. 102918, mar. 2020.
- JOHNSON, S. K. *et al.* Replacement of buckwheat by black sorghum flour on soba-type noodles. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l], v. 56, n. 11, p. 5861-5870, 6 nov. 2021.
- KHALID, W. *et al.* Nutrients and bioactive compounds of *Sorghum bicolor* L. used to prepare functional foods: a review on the efficacy against different chronic disorders. **International Journal of Food Properties**, [s. l], 2022.
- KHAN, I. *et al.* Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. **Food Research International**, [s. l], v. 54, n. 1, p. 578-586, 2013.

- KHAN, I. *et al.* Effect of sorghum flour addition on in vitro starch digestibility, cooking quality, and consumer acceptability of durum wheat pasta. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 79, n. 8, 2014.
- KHAN, I. *et al.* Acute effect of sorghum flour-containing pasta on plasma total polyphenols, antioxidant capacity and oxidative stress markers in healthy subjects: a randomised controlled trial. **Clinical Nutrition**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 415-421, 2015.
- KHODDAMI, A. *et al.* Sorghum in foods: functionality and potential in innovative products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 63, n. 9, p. 1170-1186, 3 abr. 2023.
- KUMARI, P. K. *et al.* Exploring anthocyanins, antioxidant capacity and α -glucosidase inhibition in bran and flour extracts of selected sorghum genotypes. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 41, p. 100979, jun. 2021.
- KIPTANUI, E. B. *et al.* Optimization of fermentation and malting process of sorghum beverage and effects on nutritional quality. **African Journal of Food Science**, [s. l.], v. 16, n. 10, p. 252-260, 31 out. 2022.
- LI, Z. *et al.* The effects of processing on bioactive compounds and biological activities of sorghum grains. **Molecules**, [s. l.], v. 27, n. 10, p. 3246, 19 maio 2022.
- LINKS, M. R. *et al.* Sorghum condensed tannins encapsulated in kafirin microparticles as a nutraceutical for inhibition of amylases during digestion to attenuate hyperglycaemia. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 12, p. 55-63, 2015.
- LIU, C. *et al.* Liquor flavour is associated with the physicochemical property and microbial diversity of fermented grains in waxy and non-waxy sorghum (*Sorghum bicolor*) during fermentation. *Frontiers in Microbiology*, [s. l.], v. 12, 17 jun. 2021.
- LIU, J. *et al.* Association between reactive oxygen species, transcription factors, and candidate genes in drought-resistant sorghum.

- International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 25, n. 12, p. 6464, 12 jun. 2024.
- LUZARDO-OCAMPO, I. *et al.* Impact of cooking and nixtamalization on the bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds from two sorghum varieties. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 309, p. 1-11, 2020.
- MAJZOobi, M. *et al.* The role of ancient grains in alleviating hunger and malnutrition. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2213, 31 maio 2023.
- MANSOUR, M. M. F. *et al.* Sorghum under saline conditions: responses, tolerance mechanisms, and management strategies. **Planta**, [s. l.], v. 254, n. 2, p. 24, 5 ago. 2021.
- MARSTON, K.; KHOURYIEH, H.; ARAMOUNI, F. Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. **LWT**, [s. l.], v. 65, p. 637-644, 2016.
- MARTINO, H. S. D. *et al.* Chemical characterization and size distribution of sorghum genotypes for human consumption. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 71, n. 2, p. 337-344, 2012.
- MCGINNIS, M. J.; PAINTER, J. E. Sorghum: history, use, and health benefits. **Nutrition Today**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 38-44, 1 jan. 2020.
- MCGINNIS, M. J.; WEBSTER, M. Current and potential future uses of sorghum to increase nutrient density for human foods. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 89, n. S1, 28 dez. 2024.
- MEZGEBE, A. G.; ABEGAZ, K.; TAYLOR, J. R. N. Relationship between waxy (high amylopectin) and high protein digestibility traits in sorghum and malting quality. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 79, p. 319-327, jan. 2018.
- MORAES, É. A. *et al.* Sorghum flour fractions: correlations among polysaccharides, phenolic compounds, antioxidant activity and glycemic index. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 180, p. 116-123, ago. 2015.
- MORAES, É. A. *et al.* Whole sorghum flour improves glucose tolerance, insulin resistance and preserved pancreatic islets function

- in obesity diet-induced rats. **Journal of Functional Foods**, [s. l], v. 45, p. 530-540, jun. 2018.
- MORAES, É. A. *et al.* Domestic processing effects on antioxidant capacity, total phenols and phytate content of sorghum. **Current Nutrition & Food Science**, [s. l], v. 16, n. 4, p. 501-507, 13 jul. 2020.
- MORENO, C. R. *et al.* Changes in nutritional properties and bioactive compounds in cereals during extrusion cooking. *In: Extrusion of metals, polymers and food products*. [S. l]: InTech, 2018.
- MUKISA, I. M.; NTAATE, D.; BYAKIKA, S. Application of starter cultures in the production of Enturire – a traditional sorghum-based alcoholic beverage. **Food Science & Nutrition**, [s. l], v. 5, n. 3, p. 609-616, 25 maio 2017.
- NAGY, R. *et al.* Condensed tannin content and antioxidant activity of Hungarian sorghum varieties grown at Research Institute in Karcag. **Acta Agraria Debreceniensis**, [s. l], n. 1, p. 155-160, 1 jun. 2021.
- NOERHARTATI, E. *et al.* Sensory evaluation of sorghum cakes: substituting sorghum flour for rice flour, sticky rice flour and wheat flour. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l], v. 1469, n. 1, 2020.
- NYONI, N. *et al.* Understanding biodiversity in sorghums to support the development of high value bio-based products in sub-Saharan Africa. **Journal of Cereals and Oilseeds**, [s. l], v. 11, n. 2, p. 37-43, 30 set. 2020.
- OFOSU, F. K. *et al.* Flavonoids in decorticated sorghum grains exert antioxidant, antidiabetic and antiobesity activities. **Molecules**, [s. l], v. 25, n. 12, p. 2854, 20 jun. 2020.
- OLIVEIRA, F. C. E. de *et al.* Greek yogurt with added sorghum flours: antioxidant potential and sensory acceptance. **Revista Chilena de Nutrición**, [s. l], v. 47, n. 2, p. 272-280, abr. 2020.

- OLIVEIRA, K. G. de *et al.* Effect of the storage time and temperature on phenolic compounds of sorghum grain and flour. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 216, p. 390-398, 2017.
- OLIVEIRA, L. de L. de *et al.* Physical, chemical, and antioxidant analysis of sorghum grain and flour from five hybrids to determine the drivers of liking of gluten-free sorghum breads. **LWT**, [s. l.], v. 153, p. 112407, jan. 2022.
- OLIVEIRA, L. de L. de *et al.* Gluten-free sorghum pasta: composition and sensory evaluation with different sorghum hybrids. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 19, p. 3124, 8 out. 2022.
- ONU – Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasília, DF: ONU, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- PAIVA, C. L.; QUEIROZ, V. A. V.; GARCIA, M. A. V. T. Características tecnológicas, sensoriais e químicas de massas secas sem glúten à base de farinhas de sorgo e milho. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 22, p. 1-9, 2019.
- PALAVECINO, P. M. *et al.* Gluten-free sorghum pasta: starch digestibility and antioxidant capacity compared with commercial products. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 99, n. 3, p. 1351-1357, 2018.
- PARK, M.-Y. *et al.* Effects of *Panicum miliaceum* L. extract on adipogenic transcription factors and fatty acid accumulation in 3T3-L1 adipocytes. **Nutrition Research and Practice**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 192, 2011.
- PEREIRA, L. M.; HAWKES, C. Leveraging the potential of sorghum as a healthy food and resilient crop in the South African food system. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 6, 20 maio 2022.
- PEZZALI, J. G. *et al.* Characterization of white and red sorghum flour and their potential use for production of extrudate crisps. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. e0234940, 23 jun. 2020.

- PONTIERI, P. *et al.* Comparison of content in phenolic compounds and antioxidant capacity in grains of white, red, and black sorghum varieties grown in the Mediterranean area. **ACS Food Science & Technology**, [s. l.], v. 1, n. 6, p. 1109-1119, 16 jul. 2021.
- PONTIERI, P. *et al.* Nutritional composition, fatty acid content, and mineral content of nine sorghum (*Sorghum bicolor*) inbred varieties. *Foods*, [s. l.], v. 13, n. 22, p. 3634, 14 nov. 2024.
- POQUETTE, N. M.; GU, X.; LEE, S. O. Grain sorghum muffin reduces glucose and insulin responses in men. **Food and Function**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 894-899, 2014.
- PRADO, M. E. A. *et al.* Physicochemical and sensorial characteristics of beef burgers with added tannin and tannin-free whole sorghum flours as isolated soy protein replacer. **Meat Science**, [s. l.], v. 150, p. 93-100, 2019.
- PRASAD, M. P. R. *et al.* Glycaemic index and glycaemic load of sorghum products. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 95, n. 8, p. 1626-1630, 2014.
- PRZYBYLSKA-BALCEREK, A.; FRANKOWSKI, J.; STUPER-SZABLEWSKA, K. Bioactive compounds in sorghum. **European Food Research and Technology**, [s. l.], v. 245, n. 5, p. 1075-1080, 1 maio 2019.
- PUNIA, H. *et al.* Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] grains. **Cereal Research Communications**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 343-353, 1 set. 2021.
- QUEIROZ, V. A. V. *et al.* Potencial funcional e tecnologia de processamento do sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], para alimentação humana. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 10, n. 3, p. 180-195, 30 dez. 2011.
- QUEIROZ, V. A. V. *et al.* A low calorie and nutritive sorghum powdered drink mix: influence of tannin on the sensorial and functional properties. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 79, p. 43-49, 2018.

- QUEIROZ, V. A. V. *et al.* Retention of phenolic compounds and acceptability of gluten-free churros made with tannin or tannin-free sorghum flour. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 55, 2020.
- QUEIROZ, V. A. V. *et al.* **Sorgo na produção de alimentos sem glúten**: propriedades sensoriais, nutricionais e funcionais. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021.
- QUEIROZ, V. A. V. *et al.* Baking process effects and combined cowpea flour and sorghum bran on functional properties of gluten-free cookies. **Plant Foods for Human Nutrition**, [s. l.], v. 77, n. 4, p. 552-559, 18 dez. 2022.
- QUEIROZ, V. A. V. *et al.* Sorgo para alimentação humana. In: **Melhoramento genético do sorgo**. [S. l.]: [s. n.], p. 546.
- RACHMAWATI, L. *et al.* Effects of sorghum cookies (*Sorghum bicolor* L. Moench) on fasting glucose, triglyceride, high-density lipoprotein level, and body fat percentage in adolescent obesity. **The Indonesian Journal of Nutrition**, [s. l.].
- RAGAEI, S.; ABDEL-AAL, E.-S.; NOAMAN, M. Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 98, n. 1, p. 32-38, 2006.
- RASHWAN, A. K. *et al.* Potential processing technologies for developing sorghum-based food products: an update and comprehensive review. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], 1 abr. 2021.
- RATNAVATHI, C. V.; CHAVAN, U. D. Sorghum syrup and other by products. In: **Sorghum biochemistry**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 253-310.
- REDDY, P. A. *et al.* Development and analysis of sorghum crackers. **International Journal of Scientific Research in Science and Technology**, [s. l.], p. 26-31, 5 mar. 2019.
- REIS GALLO, L. R. dos *et al.* Impact of gluten-free sorghum bread genotypes on glycemic and antioxidant responses in healthy adults. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 10, 1 out. 2021.

- RUMLER, R.; BENDER, D.; SCHÖNLECHNER, R. Sorghum and its potential for the western diet. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], 1 mar. 2022.
- SAURA-CALIXTO, F. Dietary fiber as a carrier of dietary antioxidants: an essential physiological function. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 43-49, 12 jan. 2011.
- SERNA-LOAIZA, S. *et al.* A review on the feedstocks for the sustainable production of bioactive compounds in biorefineries. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 23, p. 6765, 28 nov. 2019.
- SHIM, T.-J. *et al.* Toxicological evaluation and anti-inflammatory activity of a golden gelatinous sorghum bran extract. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, [s. l.], v. 77, n. 4, p. 697-705, 23 abr. 2013.
- SILVA, T. N. *et al.* Progress and challenges in sorghum biotechnology, a multipurpose feedstock for the bioeconomy. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 73, n. 3, p. 646-664, 27 jan. 2022.
- SINGH, P. *et al.* Sugar and sugar substitutes: recent developments and future prospects. In: **Sugar and sugar derivatives**: changing consumer preferences. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 39-75.
- SOARES, S. *et al.* Tannins in food: insights into the molecular perception of astringency and bitter taste. **Molecules**, [s. l.], v. 25, n. 11, p. 2590, 2 jun. 2020.
- STEFOSKA-NEEDHAM, A. *et al.* Flaked sorghum biscuits increase postprandial GLP-1 and GIP levels and extend subjective satiety in healthy subjects. **Molecular Nutrition & Food Research**, [s. l.], v. 60, n. 5, p. 1118-1128, 17 maio 2016.
- STEFOSKA-NEEDHAM, A.; BECK, E. J.; TAPSELL, L. C. Perspective: the path to confirming and exploiting potential satiety-enhancing effects of sorghum-based foods for human diets.

- Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 593-596, out. 2016.
- STEFOSKA-NEEDHAM, A.; TAPSELL, L. Considerations for progressing a mainstream position for sorghum, a potentially sustainable cereal crop, for food product innovation pipelines. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 97, p. 249-253, mar. 2020.
- SURAHMAN, D. N. *et al.* Formulation and characterization of instant baby complementary food from red sorghum flour (*Sorghum bicolor* (L) Moench) and papaya puree (*Carica papaya* Linn.). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, [s. l.], v. 733, n. 1, p. 012072, 1 abr. 2021.
- TADEU DA VEIGA CORREIA, V. *et al.* Tannin-sorghum flours in cream cheese: physicochemical, antioxidant and sensory characterization. **LWT**, [s. l.], v. 154, p. 112672, jan. 2022.
- TANWAR, R. *et al.* Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: a review. **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 3, p. 100501, dez. 2023.
- TAYLOR, J. *et al.* Preferential binding of sorghum tannins with γ -kafrin and the influence of tannin binding on kafrin digestibility and biodegradation. **Journal of Cereal Science**, [s. l.], v. 46, n. 1, p. 22-31, jul. 2007.
- TAYLOR, J. R. N.; DUODU, K. G. Resistant-type starch in sorghum foods—factors involved and health implications. **Starch/Staerke**, [s. l.], 1 set. 2023.
- TEFERRA, T. F.; AWIKA, J. M. Sorghum as a healthy global food security crop: opportunities and challenges. **Cereal Foods World**, [s. l.], v. 64, n. 5, 2019.
- TEIXEIRA, N. D. C. *et al.* Resistant starch content among several sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes and the effect of heat treatment on resistant starch retention in two genotypes. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 197, p. 291-296, 15 abr. 2016.

- TIAN, Y. *et al.* High molecular weight persimmon tannin ameliorates cognition deficits and attenuates oxidative damage in senescent mice induced by d-galactose. **Food and Chemical Toxicology**, [s. l.], v. 49, n. 8, p. 1728-1736, ago. 2011.
- TIREKI, S. A review on packed non-alcoholic beverages: ingredients, production, trends and future opportunities for functional product development. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 112, p. 442-454, jun. 2021.
- TOLEDO, V. C. S. *et al.* Extrusion cooking of gluten-free whole grain flour blends. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 2, 6 fev. 2020.
- USDA – United States Department of Agriculture. **National nutrient database for standard reference legacy release**: full report (all nutrients). [S. l.]: USDA, 2023. Disponível em: <https://ndb.nal.usda.gov>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- WILLETT, W. *et al.* Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. **The Lancet**, [s. l.], v. 393, n. 10170, p. 447-492, fev. 2019.
- WU, G. *et al.* Phenolic profile and content of sorghum grains under different irrigation managements. **Food Research International**, [s. l.], v. 97, p. 347-355, jul. 2017.
- XIONG, K. *et al.* Formation and reduction of toxic compounds derived from the maillard reaction during the thermal processing of different food matrices. **Journal of Food Protection**, [s. l.], v. 87, n. 9, p. 100338, set. 2024.
- XIONG, Y. *et al.* Sorghum grain: from genotype, nutrition, and phenolic profile to its health benefits and food applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 2025-2046, 2019.
- XU, J.; WANG, W.; ZHAO, Y. Phenolic compounds in whole grain sorghum and their health benefits. **Foods**, [s. l.], 1 ago. 2021.
- YANG, L.; BROWNING, J. D.; AWIKA, J. M. Sorghum 3-deoxyanthocyanins possess strong phase II enzyme inducer activity and

- cancer cell growth inhibition properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 57, n. 5, p. 1797-1804, 11 mar. 2009.
- YU, M. *et al.* Comparison of nutritional quality and sensory acceptability of biscuits obtained from wheat, native, or extruded sorghum flour. **Cereal Chemistry**, [s. l.], v. 97, n. 6, p. 1244-1253, 2 nov. 2020.
- ZHANG, G.; HAMAKER, B. R. Slowly digestible starch: concept, mechanism, and proposed extended glycemic index. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 49, n. 10, p. 852-867, 10 dez. 2009.
- ZIA UL HAQ, M.; RIAZ, M.; SAAD, B. **Anthocyanins and human health**: biomolecular and therapeutic aspects. Cham: Springer International Publishing, 2016.

Desenvolvimento de produtos alimentícios adicionados de insetos comestíveis: inovação e sustentabilidade para a alimentação

*Gabriela Luiz Meigre Dias Pereira • Luiza Sant' Anna Ruy •
Érica Aguiar Moraes*

A dinâmica populacional tem sofrido modificações significativas nos últimos tempos em decorrência do acelerado crescimento demográfico. Estimativas do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, representativo das Nações Unidas, apontam uma ampliação dos indicadores de crescimento da população, a qual em 2050, o número de habitantes poderá ser de, aproximadamente, 9,7 milhões (DESA, 2022). Esse cenário resulta no fenômeno do superpovoamento, que está diretamente relacionado com a expansão da demanda global por

alimentos, podendo alcançar um acréscimo de até 70% nas necessidades alimentares globais (BARNABÉ *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, a produção do setor alimentício, especialmente das fontes convencionais de proteínas, não será suficiente para suprir a população mundial, levando ao esgotamento de recursos agrícolas, florestais, pesqueiros, hídricos e da biodiversidade. Assim, torna-se viável a adoção de modelos de produção alimentar mais sustentáveis, como a introdução insetos na dieta da população, apresentados como uma alternativa promissora de fonte alimentar (CHANTAWANNAKUL, 2020; RAHEEM *et al.*, 2019).

O desenvolvimento da entomofagia apresenta vantagens importantes no processo produtivo global, como a maior eficiência na conversão alimentar e redução dos poluentes, quando comparado a criação pecuária tradicional (CHEUNG; MORAES, 2016; BARNABÉ *et al.*, 2024). A exemplo disso, é válido citar a maior conversão alimentar, onde para produzir 1 kg de insetos comestíveis, são necessários, aproximadamente, 2 kg de ração, para a produção de 1 kg de carne bovina, por sua vez, são necessários 8 kg (VAN HUIS *et al.*, 2013). Adicionalmente, a produção de insetos fornece uma diminuição relevante na emissão de gases causadores do efeito estufa (até 100 vezes), redução da poluição da água e menor demanda de espaço para produção (cerca de 50 a 90% menor do que o gado tradicional para produção de 1 kg de inseto/carne bovina), além da baixa contaminação ambiental (OONINCX *et al.*, 2010; IMATHIU, 2020).

Estudos demonstraram que a utilização de insetos como ingredientes contribui para a melhora do valor nutricional dos alimentos (DJOUADI *et al.*, 2022; GONZÁLEZ *et al.*, 2019), isso ocorre devido a sua composição nutricional atrativa, incluindo a presença de proteínas, minerais, vitaminas e fibras (BISCOSIN-JUNIOR *et al.*, 2022; KRONGDAN *et al.*, 2023; VAN HUIS *et al.*, 2013). Além disso, essa prática vai além das propriedades nutricionais e funcionais, haja vista que também fornecem propriedades tecnológicas aos alimentos, como emulsificação, gelatinização e formação de espuma, podendo ser

utilizados como aditivos alimentares (MISHYNA *et al.*, 2019). Portanto, considerando o potencial do uso de insetos como ingredientes para elevar o valor nutricional, as questões tecnológicas e propriedades sensoriais dos alimentos, sua utilização como ingrediente na formulação de produtos representa uma estratégia eficaz para integrar este recurso na indústria alimentícia (GONZÁLEZ *et al.*, 2019; ZIELINSKA; PANKIEWICZ, 2020).

Neste sentido, são apresentadas, neste capítulo, informações quanto ao uso de insetos na alimentação humana, as espécies mais comuns, assim como seu valor nutricional, seu potencial bioativo e tecnológico, além das questões relacionadas à regulamentação de uso.

Uso de insetos na alimentação humana

A entomofagia se refere ao uso de insetos como alimentos (HUIS *et al.*, 2013). A incorporação dos insetos na dieta humana, apesar de ser uma prática milenar, ainda é amplamente praticada em diversos países do mundo, principalmente nas regiões da Europa, América do Norte, América latina e Ásia (MASON *et al.*, 2018; ROOS, 2018; WOOLF *et al.*, 2019). Entretanto, historicamente, no mundo ocidental, existe uma aversão significativa à inclusão de insetos na alimentação, sendo considerada uma prática repugnante ou inaceitável pela maioria das sociedades (VERBEKE, 2015; CHOI *et al.*, 2024; GMUER *et al.*, 2016; LENSVELT; STEENBEKKERS, 2014). Esta cultura de rejeição aos insetos se deve, principalmente, à falta de informações claras e acessíveis sobre os benefícios nutricionais e ambientais proporcionados pelo consumo de insetos, que impacta diretamente na escolha do consumidor, limitando a familiaridade com esses novos alimentos (HALLORAN; FLORE, 2018; CHOI *et al.*, 2024).

Segundo Sun-waterhouse *et al.* (2016), as escolhas alimentares são determinadas e influenciadas por fatores como fome, preço, acessibilidade, normas sociais, culturais, atributos e padrões de refeição,

determinantes psicológicos e experiências anteriores com os alimentos. Contudo, há maior aceitação e a popularidade da entomofagia, onde a prática de consumir insetos é influenciada por aspectos culturais, sendo mais comum em países os quais esses alimentos fazem parte da tradição e da dieta cotidiana (SUN-WATERHOUSE *et al.*, 2016). Adicionalmente, o contato com outros consumidores de insetos pode reduzir a repulsa e aumentar a aceitação (RUSSELL; KNOTT, 2021).

No Brasil, há registros do consumo de insetos na maioria dos estados, sendo ingeridos em estágios imaturos como ninfas, larvas ou pupas (COSTA NETO; RAMOS-ELOURDY; PINO, 2006). Um estudo exploratório realizado por Schardong *et al.* (2019), analisou o consumo de insetos em todas as cinco regiões do país, com a participação de 1.619 pessoas. Entretanto, os resultados indicaram que 85,79% da população nunca havia consumido inseto, enquanto a região Norte apresentou o maior índice de consumo (21,43%) entre aqueles que já haviam incluído insetos na alimentação. Somando-se a isso, 45,67% dos participantes afirmaram não ter opinião definitiva sobre a inserção de insetos na alimentação (SCHARDONG *et al.*, 2021). Os autores afirmaram que essa resistência está diretamente relacionada à cultura alimentar brasileira, que historicamente associa o hábito de consumir insetos a práticas primitivas, especialmente na população indígena (SCHARDONG *et al.*, 2020). Nesse contexto, uma pesquisa realizada com formiga içá, evidencia a necessidade de incentivar a pesquisa e a elaboração de preparações com a valorização do ingrediente e da herança cultural indígena, além de ressaltar seus benefícios nutricionais (FONTES; SANTOS; HENRIQUE, 2018). Entretanto, segundo Cheung; Da Silva; Pereira (2018), a coleta desses insetos é realizada na natureza, não há regulamentação da produção e processamento, tampouco é destinada para a alimentação humana. Em trabalho voltado para o conhecimento sobre a percepção do consumo de insetos ressalta-se uma posição negativa quanto à disposição sobre o ato de pensar em consumir insetos, atitudes neofóbicas relacionadas à emoção de nojo, repulsa e medo (CHEUNG E MORAES, 2016). Neste

contexto, os autores advertem que para incentivar o consumo deste alimento no Brasil não é suficiente a alegação de benefícios ao corpo como, por exemplo, “animais ricos em proteínas” ou “produção sustentável”, e para que possam ser consumidos devem “transpassar a barreira do corpo”. Além disso, em estados como Minas Gerais, Amazonas e São Paulo, onde há registros de extrativismo de insetos, o consumo não se restringe apenas às comunidades indígenas. Nessas localidades, a ingestão ocorre de forma esporádica ou em ocasiões especiais, demonstrando que a aceitação da entomofagia pode variar de acordo com fatores culturais e regionais (MACEDO *et al.*, 2017; ROMEIRO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2015).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura incentiva essa prática como uma estratégia para aliar saúde e desenvolvimento sustentável, contribuindo para um futuro alimentar mais equilibrado e ecologicamente responsável (FAO, 2013). Nesse sentido, torna-se fundamental promover pesquisas e ações educativas para desmistificar o consumo de insetos e incentivar sua inclusão na alimentação, a partir do conhecimento sobre as espécies comestíveis e suas características nutricionais.

Espécies de insetos utilizadas na alimentação e características nutricionais

Estudos da década de noventa e 2000, apontaram uma estimativa de 1000 espécies de insetos comestíveis (DEFOLIART, 1997; RAMOS-ELORDUY, 2005). Contudo, o inventário global conduzido por Omuse *et al.* (2024), fundamentado na literatura científica e incluindo dados de países ocidentais e regiões temperadas, listou 2205 espécies de insetos, consumidas em 128 países no mundo. Esses dados evidenciam uma tendência crescente da inclusão de maior variedade de espécies na alimentação humana. Entre os continentes, a Ásia tem

o maior número de insetos comestíveis (932 espécies), seguida pela América do Norte, principalmente no México, e África.

Pertencentes ao filo *Arthropoda*, os insetos representam a maior diversidade de formas de vida no planeta Terra, podendo chegar a 78% das espécies existentes (DE CARVALHO *et al.*, 2019; GLOVER E SEXTON, 2015; OMUSE *et al.*, 2024). Entre os insetos consumidos pela humanidade, destacam-se, respectivamente, os besouros (*Coleoptera*), Lagartas (*lepidoptera*), abelhas, vespas e formigas (*Hymenoptera*), gafanhotos, locustas e grilos (*Orthoptera*), cigarras, percevejos e cochonilhas (*Hemiptera*), cupins (*Ioptera*), libélulas (*Odanata*) e moscas (*Diptera*) (VAN HUIS, 2015; OMUSE *et al.*, 2024). Esses insetos podem ser utilizados na alimentação humana em diferentes estágios de desenvolvimento: ovos, larvas, pupas ou adultos (CASTRO *et al.*, 2020)

A ordem *Coleoptera* compõem uma diversidade de insetos, entre os quais o mais popular na entomofagia são os besouros. Há indicativos de que a espécie de besouros constitui cerca de 40% do total de espécies registradas. Em algumas partes do mundo, incluindo o Brasil, espécies da família Tenebrionidae, como *Tenebrio molitor* (larva-de-farinha), *Alphitobius diaperinus* (cascudinho) e *Zophobas morio* (Tenebrio gigante), destacam-se como as mais promissoras para futura inserção no setor alimentício humano (ARAÚJO *et al.*, 2019; YI *et al.*, 2013; VAN HUIS, 2015). Essa tendência se deve ao fato de essas espécies apresentarem características que favorecem sua produção em larga escala, como alta taxa de reprodução, curto ciclo de vida e elevada capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais (ARAÚJO *et al.*, 2019).

Uma espécie de destaque no Brasil é a formiga içá, também conhecida como tanajura (*Atta sexdens*), pertence à ordem *Hymenoptera*, a segunda maior entre os insetos comestíveis no mundo, ficando atrás apenas da ordem *Coleoptera* (OMUSE *et al.*, 2024). Essa espécie possui ampla distribuição geográfica, resultado de seu alto grau de adaptação e capacidade de sobrevivência na natureza, o que facilita sua criação para o setor alimentício (OMUSE *et al.*, 2024). A inclusão

de formigas na alimentação faz parte da cultura de comunidades locais do Amazonas, Minas Gerais e nordeste brasileiro, onde são tradicionalmente preparadas torradas ou assadas na manteiga com farinha de mandioca (SENA, 2021).

Embora não faça parte do consumo habitual, os insetos são amplamente reconhecidos por seu alto valor proteico, podem fornecer entre 10 e 20% da Ingestão Diária Recomendada (DRI) em uma porção usual (PHILIPPI, 2015; TANGA; EKESI, 2024). Em média, apresentam 75 g.100 g⁻¹ de matéria seca em proteínas, contendo treonina, triptofano e lisina, considerados aminoácidos essenciais ao ser humano. Além disso, possuem alto teor lipídico, cerca de 30 g.100 g⁻¹ de matéria seca, com destaque para os ácidos graxos poliinsaturados, além de serem fonte de importantes de vitaminas e minerais como zinco, cálcio e ferro (RUMPOLD; SCHLUTER, 2013; ZIELIŃSKA *et al.*, 2015; MWANGI *et al.*, 2018).

Entre as espécies com maior potencial nutricional, o *Tenebrio molitor* se destaca pelo alto teor proteico (52,3 5%), com aminoácidos essenciais como metionina e cisteína, além de um teor lipídico de 24,7%, composto por ácidos graxos saturados (25%), poliinsaturados (31%) e monoinsaturados (43%), resultando em um valor energético de 444 kcal.100 g⁻¹(ZIELIŃSKA *et al.*, 2015). Estudos reforçam seu potencial nutricional, como Medrado *et al.* (2018) que quantificaram teores de proteína entre 48% e 49,95% e lipídios entre 34,53% e 37,63%, superiores a fontes convencionais como o farelo de soja. Castro (2021) encontrou um teor proteico menor (33,82%), possivelmente devido à presença de quitina, mas confirmou um alto teor lipídico (34,18%), reforçando o *Tenebrio molitor* como uma fonte viável de proteínas e gorduras benéficas para a alimentação humana.

Dando continuidade, Kuntandi *et al.* (2018), realizou um estudo sobre valor nutricional de insetos comumente consumidos por algumas comunidades. Entre essas espécies, destacou-se a *Bombyx mori* L, conhecida como bicho-de-seda, que, em sua fase de pupa, apresentou um alto teor de proteína, atingindo 60,03%, além de um teor de

lipídios de 29,47%. Outra espécie de relevância analisada foi *Zophobas morio* F., popularmente conhecida como larva gigante de farinha, estudada em sua fase larval. Os resultados indicaram um teor proteico de 49,96% e um teor lipídico de 28,98%, evidenciando seu potencial nutricional (KUNTANDI *et al.*, 2018).

É importante destacar a composição das frações lipídicas nas espécies de insetos comestíveis. Alves *et al.* (2016), investigaram o conteúdo lipídico extraído da espécie *Tenebrio molitor* e os resultados revelaram que essa espécie contém aproximadamente 33,20% de ácidos graxos saturados. Santos *et al.* (2021), por meio de um estudo de revisão, expõe que os insetos possuem uma proporção de ácidos graxos saturados para insaturados inferior a 40%, baixo ou nenhum teor de gordura *trans* e elevada concentração de ácidos graxos ômega-3. Nesse sentido, o estudo de Womeni *et al.* (2009) investigou o conteúdo lipídico extraído de algumas espécies de insetos comestíveis e revelou que seus óleos são ricos em ácidos graxos poliinsaturados, sendo os ácidos graxos essenciais o linoleico e o linolênico.

Um estudo realizado por Gallo (2020) revelou que as formigas *Atta sexdens*, com base no seu elevado conteúdo proteico (68,56%), se caracterizam como uma alternativa para fabricação de rações, farinhas e ingrediente em suplementos nutricionais (SANTOS, 2020). Ademais, a utilização dos óleos extraídos de diferentes espécies de insetos na alimentação humana, como fontes de ácidos graxos essenciais, também é evidenciada (JEON *et al.*, 2016).

Diante dessas características nutricionais, a inserção de insetos na alimentação humana representa uma alternativa inovadora e sustentável, capaz de diversificar as fontes proteicas e lipídicas convencionais. É importante destacar que a composição nutricional dos insetos é variável, sendo influenciada por fatores como a espécie, o estágio de desenvolvimento, as condições ambientais e os métodos de processamento utilizados (CASTRO *et al.*, 2020).

Potencial funcional do consumo de insetos

Além de suas características nutricionais, os insetos também podem oferecer um potencial funcional, com benefícios que estão diretamente relacionados à saúde humana. Estudos indicam que os insetos são fontes de peptídeos bioativos, compostos formados por sequências específicas de aminoácidos presentes na estrutura da proteína (TANGA; EKESI, 2024; AKBARIAN *et al.*, 2022). Contudo, essas moléculas não apresentam bioatividade enquanto fazem parte da estrutura primária da proteína. Para ativar o potencial bioativo, é necessário submeter as proteínas a processos de hidrólise, que liberam as sequências de aminoácidos responsáveis pelas propriedades bioativas (AKBARIAN *et al.*, 2022, CHAKRABARTI *et al.*, 2018).

O processo de hidrólise proteica consiste na quebra de moléculas de proteína por meio de reações químicas ou da ação de enzimas específicas, resultando na formação de pequenos peptídeos de diferentes tamanhos e, em alguns casos, em aminoácidos (AKBARIAN *et al.*, 2022). No contexto dos insetos, a hidrólise enzimática é considerada a melhor opção para obtenção de peptídeos bioativos. Esse processo pode ser realizado de três formas principais: ação de enzimas endógenas, utilização de enzimas exógenas ou por meio da fermentação microbiana. Mintah *et al.* (2019) conduziu um estudo no qual peptídeos bioativos foram extraídos da espécie *Hermetia illucens*, popularmente conhecida como mosca soldado negra, por meio de hidrólise enzimática utilizando a enzima Alcalase. Os autores ressaltam que a seleção do método de hidrólise considerou diversos fatores, como a composição proteica do inseto, o tipo de peptídeo almejado e o objetivo de obter peptídeos com atividade antioxidante (MINTAH *et al.*, 2019).

Em estudo *in vitro*, os produtos não digeríveis deste inseto resultaram em efeitos positivos sobre a microbiota intestinal, com aumento da produção de ácidos graxos de cadeia curta (DE CARVALHO *et al.*, 2019). Dai *et al.* (2013) indicou o tenébrio como candidato

para a produção de peptídeos bioativos inibidores da Enzima Conversora da Angiotensina (ECA), principal regulador da pressão arterial, para uso tanto na indústria de alimentos quanto de nutracêuticos. Além disso, os peptídeos de insetos como *Gryllobates sigillatus*, *Schistocerca gregaria* e *Tenebrio molitor* têm sido identificados e associados capacidade antioxidante e anti-inflamatória (ZIELINSKA; BARANIAK; KARAS, 2018).

Entre os efeitos atribuídos aos peptídeos bioativos extraídos de insetos comestíveis, destacam-se suas propriedades antioxidantes, antidiabética, anti-hipertensiva e prebiótica (MATOS; CASTRO, 2021; CARVALHO. *et al*, 2019). Diante disso, o trabalho realizado por D'Antonio *et al*. (2021), buscou fazer uma revisão de literatura sobre as propriedades funcionais de diferentes espécies de insetos. A pesquisa concluiu que, entre, as espécies de insetos estudadas, o *Gryllus bimaculatus* e *Tenebrio molitor*, apresentaram propriedades de captura de radicais livres ou quelantes de íons metálicos, além da capacidade de modular enzimas antioxidantes *in vitro* (D'ANTONIO *et al*, 2021).

Complementando essas descobertas, Hall *et al*. (2019) aprofundaram a investigação sobre as propriedades funcionais dos insetos em suas pesquisas, com ênfase na espécie *Gryllobates sigillatus*, tradicionalmente nomeada como Grilo-doméstico tropical. Os resultados demonstraram que, além da atividade antioxidante relatada para outras espécies, também apresentou propriedades antidiabéticas e anti-hipertensivas, sugerindo seu potencial para aplicações terapêuticas e no desenvolvimento de alimentos funcionais.

Com relação a sua propriedade prebiótica, Carvalho *et al*. (2019), conduziram um estudo para analisar os efeitos da farinha de *Tenebrio molitor* no crescimento e na atividade metabólica de bactérias benéficas ao intestino. Para isso, os pesquisadores desenvolveram um modelo *in vitro* otimizado de simulação da microbiota intestinal, no qual foram utilizadas culturas puras de diferentes cepas de *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*. Os resultados do estudo demonstraram que a farinha de *Tenebrio molitor* favoreceu significativamente o

crescimento das bactérias probióticas testadas, indicando seu potencial efeito prebiótico. Diante dessas descobertas, os autores destacam que o potencial prebiótico da farinha de *Tenebrio molitor* pode trazer benefícios significativos para sua inserção na indústria alimentícia como um ingrediente nutritivo e funcional (CARVALHO *et al.*, 2019)

Assim, pode-se concluir que os insetos comestíveis representam um substrato promissor para obtenção de peptídeos, devido ao perfil nutricional diversificado e alto teor de proteínas (RUMPOLD; SCHLUTER, 2013). Entre os efeitos atribuídos a esses compostos, destacam-se suas propriedades antioxidantes, antidiabética, anti-hipertensiva e prebiótica (MATOS; CASTRO, 2021; CARVALHO. *et al.*, 2019). Essas funcionalidades tornam os insetos uma alternativa promissora no desenvolvimento de alimentos funcionais adicionados de insetos comestíveis.

Produtos adicionados de insetos comestíveis e propriedades tecnológicas

Em função das propriedades nutricionais e funcionais, a farinha de tenebrio tem sido utilizada na preparação de produtos frequentemente consumidos elaborados a partir de farinha de trigo refinada, incluindo pão, biscoitos, bolos e muffins (BARNABÉ *et al.*, 2024). A partir da substituição de 5% e 10% da farinha de trigo por farinha de tenebrio, não foram demonstrados impactos negativos em relação às características tecnológicas das massas de pão, além disso, houve aumento do teor proteico do produto, principalmente ao substituir aos níveis de 10% (RONCOLINI *et al.*, 2019). No entanto, através da análise sensorial, a substituição modificou a textura e a aparência do produto, como a cor da crosta, variando de acordo com o nível de substituição. Em contrapartida, ao empregar farinhas de insetos (*Hermetia illucens*, *Acheta domestica* e *Tenebrio molitor*) na fabricação de panificados ao nível de substituição de 5% em relação à farinha de

trigo, notou-se comprometimento das características reológicas como absorção de umidade e estabilidade das massas. Contudo, esses efeitos são insuficientes para impedir o uso desses ingredientes na preparação de produtos de panificação (GONZÁLEZ; GARZÓN; ROSELL, 2019).

Um estudo realizado por Megido *et al.* (2016) mostrou que insetos comestíveis também possuem utilidade na substituição de fontes proteicas. Ao substituir 50% da carne de hambúrguer por larvas de tenébrio, a preferência oscilou entre os gêneros, sendo influenciada pelo aspecto sensorial e pelo sabor. Os homens demonstram maior preferência pelo hambúrguer com o tenébrio, em relação às mulheres, contudo, as notas do atributo sabor foram intermediárias em relação ao hambúrguer de carne bovina e o de substituição com lentilhas, com preferência pelo hambúrguer de larva-de-farinha e de carne bovina. Além disso, indivíduos que haviam tido experiências sensoriais prévias com alimentos feitos a partir de insetos atribuíram notas superiores ao hambúrguer contendo insetos. Mais alternativas do uso de insetos como fontes de proteína incluem suplementos proteicos de farinha de grilo e barras de cereal proteicas (RODRIGUES, 2019; GIOTTO *et al.*, 2024)

Outro exemplo da utilização de insetos comestíveis é a substituição de fontes lipídicas nos alimentos pelos provenientes dos próprios insetos, como para fritar, assar ou temperar, além de serem adicionados a produtos como pães, bolos e queijos (DOS SANTOS; JUSTINO; JÚNIOR, 2021). Um trabalho de Delicato *et al.* (2020) estudou os efeitos da substituição da manteiga de produtos de panificação aos níveis de 5%, 25% e 50% por lipídios de *Hermetia illucens* para a produção de bolos, cookies e waffles. Foi demonstrado que, em todas as receitas, a substituição até o nível de 25% não modificou a experiência e o sabor dos alimentos. Além disso, a substituição contribuiu para a estrutura e funcionalidade dos produtos de forma similar aos efeitos da manteiga.

Um estudo realizado por Macedo *et al.* (2022) revelou que ao acrescentar 30 gramas de *Tenebrio molitor* em barras de cereais

artesanais a avaliação do sabor, aroma, textura e impressão global foram semelhantes aos do produto tradicional, sem insetos. Além disso, os participantes demonstraram maior intenção de compra nos produtos que foram enriquecidos com insetos, confirmando o potencial desse ingrediente como uma alternativa viável e sustentável para a alimentação humana.

A composição nutricional e as propriedades funcionais dos insetos comestíveis têm incentivado o surgimento de negócios inovadores em escala mundial, como a Jimini's, na França, que desde 2012 desenvolve barras de cereais, massas e salgadinhos à base de farinha de insetos. No Brasil, destacam-se a Hakkuna que produz produtos a partir da farinha de grilo e a Bugs Cook que se especializou na produção de chocolates artesanais com grilos, larvas de *Tenebrio molitor* e formigas (HENNING; DE SOUZA; MASSAROLO, 2023; TUNES, 2020). Outros empreendimentos incluem a Portugal Bugs, de Portugal, e a Entomo Farms, do Canadá, que fabricam farinhas proteicas, com cerca de 70% de proteína, a partir de grilos e larvas, além de produtos como barras proteicas e *snacks* utilizando larvas (PORTUGAL BUGS, 2019; BUG BURGER, 2019). Essas iniciativas reforçam a estratégia econômica e gastronômica dos insetos como ingredientes, tendo em vista a união da inovação com a sustentabilidade na indústria alimentícia.

Conhecidamente a textura, sabor, aroma e aparência são as principais propriedades que impactam nas atitudes de escolhas do consumidor em um alimento (WILKINSON *et al.*, 2018). Com isso, os insetos possuem a capacidade de serem empregados como ingredientes na indústria alimentícia, pelo potencial de gelatinização, emulsificação e formação de espuma (OMOTOSO, 2006). A exemplo disso, larvas de bicho-da-farinha (*Tenebrio molitor*), previamente submetidas a desengorduramento e hidrólise ácida, e pupas de bicho-da-seda (*Bombyx mori*) foram trabalhadas como componentes inovadores para salsichas emulsificadas, no qual cada tratamento de inseto foi configurado com a substituição de 10% de carne de porco magra por cada

farinha de inseto. Não foram evidenciados impactos negativos nas propriedades nutricionais e tampouco nas tecnológicas, como cor, solubilidade da proteína e rendimento no cozimento (KIM *et al.*, 2016). Por outro lado, proteínas extraídas de gafanhotos (*Schistocerca gregaria*) e abelhas (*Apis mellifera*) foram capazes de emulsificar e formar espuma, assim como as proteínas de larvas de bicho-da-farinha e pupas de bicho-da-seda, demonstrando sua possibilidade de uso como aditivos alimentares (MISHYNA *et al.*, 2019). Essas propriedades agregam características sensoriais em produtos, como cor, volume e textura, além de diminuir os componentes tecnológicos químicos dos alimentos, o que desempenha um papel fundamental na aceitação pelos consumidores (BARNABÉ *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o aumento da aceitação por parte do consumidor depende, muitas vezes, da experiência sensorial positiva com alimentos contendo insetos, processados ou não, sendo um fator crucial até mesmo para levar à reconsideração de expectativas que antes eram negativas sobre o consumo de insetos (SOGARI; BOGUEVA; MARINNOVA, 2019; SOGARI; MENOZZI; MORA, 2018). Contudo, é preciso levar em consideração a aparência e a textura da preparação, pois estes continuam sendo obstáculos mais importantes do que o próprio sabor para o fortalecimento dessa prática alimentar (SOGARI; MENOZZI; MORA, 2018). Dessa forma, a inserção de insetos em produtos processados em vez de consumidos inteiros, como farinhas, salgadinhos e massas, bem como o desenvolvimento de texturas mais familiares e personalizadas, podem ser uma inovação para superar essas dificuldades (FLORENÇA *et al.*, 2022; CICATTIELO *et al.*, 2016).

Em termos gerais, os insetos possuem um sabor suave frequentemente descrito como “semelhante a nozes”. No entanto, esse sabor pode ser alterado através da adição de ingredientes como sal, açúcar, especiarias e farinha, além de ser modificado próprio pelo método de preparo (MISHYNA *et al.*, 2019; RUBY *et al.*, 2015). Particularmente, o sabor das larvas de farinha é definido por notas de nozes combinadas com umami e cereais. Os grilos, entretanto, apresentam

sabor semelhante a frutas secas e amêndoas, enquanto sua textura é descrita como “crocante”, essa característica se deve ao alto teor de quitina presente em seu exoesqueleto (SOGARI, 2015; AGUILERA *et al.*, 2021; DAVID-BIRMAN *et al.*, 2022). Por sua vez, os gafanhotos demonstram um perfil de sabor semelhante ao camarão, nozes e vegetais (WENDIN *et al.*, 2019). Esses atributos são capazes de promover benefícios às indústrias, haja vista que permitem a substituição de aditivos químicos e a variação de sabores, tornando-os uma alternativa alimentar com o potencial de aprimorar experiências gastronômicas, assim como contribuir para a exploração de novos sabores.

Legislação

Os insetos comestíveis na alimentação humana têm despertado interesse no Brasil como uma opção sustentável e abundante em nutrientes. Porém, apesar do intenso desejo de empresas em trazer novos produtos ao comércio, uma das principais barreiras é a ausência de uma legislação específica que regule o uso de insetos na alimentação (MORAES; FERNANDES, 2018). Atualmente, a legislação existente no país está relacionada principalmente ao controle de contaminação de alimentos por pragas durante o processo de produção, armazenamento e transporte (PRADO *et al.*, 2021; BRASIL, 2002; BRASIL, 2004).

Devido à falta de regulamentação, a produção de insetos no Brasil tem sido voltada, em sua maioria, para a fabricação de ração animal. Com isso, as empresas interessadas em utilizar insetos na fabricação de alimentos, precisam solicitar à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) a avaliação de segurança, conforme estabelecido na Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 839, de 14 de dezembro de 2023, que dispõe sobre os requisitos para avaliação de segurança de novos alimentos e novos ingredientes. A autorização deve ser solicitada por meio do protocolo de petição específica de avaliação

de segurança e estar instruída com as informações e os documentos necessários, onde estão incluídos o nome do novo alimento, do fabricante e uma síntese do processo de produção. Caso a segurança seja comprovada através da correção e classificação dos dados submetidos à análise da Anvisa, a autorização para uso pode ser concedida (MARQUES *et al.*, 2021).

No contexto internacional, o *Tenebrio molitor* foi aprovado pela Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA) como um novo ingrediente alimentar. A EFSA ressalta que “os insetos são regularmente consumidos em muitas partes do mundo”, e determinou que os vermes-da-farinha são seguros para a saúde humana, desde que sejam utilizados conforme os níveis propostos para o consumo humano (DJOUADI *et al.*, 2022). Além disso, nos Estados Unidos (EUA) e Canadá também existem muitas empresas do setor de alimentos desenvolvendo e comercializando produtos à base de insetos (CHEUNG; DA SILVA; PEREIRA, 2018). Nos EUA, o termo “novos alimentos” não é empregado, de maneira geral, os produtos sem histórico de uso são classificados como aditivos alimentares e devem cumprir com os requerimentos para aprovação pré-mercado, cuja responsabilidade para avaliação de segurança é da Food and Drug Administration (FDA) (ANVISA, 2017; FDA, 2017). No Canadá, por sua vez, a regulação dos novos alimentos é exercida pela *Health Canada*, cujas regras estabelecidas encontram-se na divisão 28 da regulamentação de alimentos e medicamentos (CANADÁ, 1999; ANVISA, 2017).

Igualmente aos vermes-da-farinha, o pó de grilo também foi aprovado pela EFSA e validado como seguro para alimentação humana (EFSA PANEL ON NUTRITION, NOVEL FOODS AND FOOD ALLERGENS, 2022). Empreendimentos que desenvolvem produtos a partir do pó de grilo, como barras de proteína, massas e lanches, já estão disponíveis em diversos países ocidentais, gerando um interesse cada vez maior na pesquisa sobre este inseto (HO *et al.*, 2022), alguns exemplos dessas empresas são a Hakkuna (Brasil), BugFoundation (Alemanha) e uFoodin (Lituânia) (HENNING; DE

SOUZA; MASSAROLO, 2023; DIGITAL FOOD LAB, 2014; UFOODIN, 2025). Essas iniciativas demonstram o aumento do reconhecimento global do potencial dos insetos no consumo alimentar, facilitando o acesso e a elaboração de novos produtos.

Considerações finais

Considerando os aspectos discutidos, observa-se um crescente interesse da indústria alimentícia na produção de alimentos que contenham insetos comestíveis, isso porque essa prática além de ser inovadora e sustentável, também fornece benefícios ao valor nutricional e propriedades tecnológicas dos produtos. A introdução de insetos na alimentação humana pode proporcionar melhorias significativas no valor nutricional dos produtos, uma vez que são fontes ricas de proteínas, lipídios saudáveis, vitaminas e minerais essenciais.

No entanto, apesar das vantagens evidentes, alguns desafios ainda dificultam a aceitação e popularização desses alimentos. A falta de legislação específica acerca do tema, resulta em incertezas, tanto para os produtores, que enfrentam dificuldades para regulamentar seus produtos, quanto para os consumidores, que não possuem garantias sobre a segurança e a qualidade desses alimentos. Além disso, há uma resistência cultural significativa em aceitar a inclusão de insetos na dieta, uma vez que, em muitas sociedades, o consumo desses organismos ainda é visto com desconfiança e repulsa.

Com isso, é necessário que estratégias sejam adotadas para reverter essa situação, de modo que haja incentivo às empresas que investem nesse setor, mediante diretrizes mais claras sobre a comercialização de alimentos com insetos e campanhas informativas explicando os benefícios ambientais e nutricionais desses produtos. Assim, espera-se promover maior aceitação dos insetos como uma fonte alternativa para a indústria de alimentos.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (BRASIL). **Novos alimentos e ingredientes**: documento de base para discussão regulatória. Brasília, DF: Anvisa, 2017. Disponível em: <https://antigo.anvisa.gov.br/documents/33880/5833856/Documento+de+base+sobre+novos+alimentos/ed783550-fc93-42c-2-91cc-ccb02c36fc9>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- AGUILERA, Y. *et al.* Investigating edible insects as a sustainable food source: nutritional value and techno-functional and physiological properties. **Food & Function**, [s. l.], v. 12, n. 14, p. 6309-6322, 2021.
- AKBARIAN, M. *et al.* Peptídeos bioativos: síntese, fontes, aplicações e mecanismos de ação propostos. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 1107, 2022.
- ALVES, A. V. *et al.* **Caracterização nutricional das larvas de *Pachymerus nucleorum* F. e *Tenebrio molitor* L. alimentadas com *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd.** 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2016.
- ARAÚJO, R. R. S. *et al.* Nutritional composition of insects *Gryllus assimilis* and *Zophobas morio*: potential foods harvested in Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, [s. l.], v. 76, p. 22-26, 2019.
- BARNABÉ, M. L. F. *et al.* Effect of edible insect powder incorporation on nutritional and sensory properties of food products: a systematic review. **Journal of Insects as Food and Feed**, [s. l.], v. 1, p. 1-31, 2024.
- BELLUCO, S. *et al.* Edible insects in a food safety and nutritional perspective: a critical review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 296-313, 2013.

- BISCONSIN-JÚNIOR, A. *et al.* “Food made with edible insects”: exploring the social representation of entomophagy where it is unfamiliar. ***Appetite***, [s. l.], v. 173, p. 106001, 2022.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 216, de 15 de setembro de 2004. Regulamento técnico de boas práticas para serviços de alimentação. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 16 set. 2004.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 275, de 21 de outubro de 2002. Regulamento técnico de procedimentos operacionais padronizados e de boas práticas de fabricação em estabelecimentos produtores/industrializadores de alimentos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 23 out. 2002.
- BUG BURGER. **Bug Burger**. [S. l.]: Bug Burger, 2019. Disponível em: <https://www.bugburger.se/>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- CANADÁ. Health Canada. **Food and Drug Regulations, Division 28**: novel foods. Ottawa: Minister of Justice, 1999. Disponível em: https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/c.r.c.,_c._870/page-176.html#h-567172. Acesso em: 31 jan. 2025.
- CARVALHO, N. M. de. Potential prebiotic activity of *Tenebrio molitor* insect flour using an optimized in vitro gut microbiota model. **Food & Function**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 7051-7062, 2019.
- CASTRO, R. J. S. de *et al.* Nutritional, functional and biological properties of insect proteins: processes for obtaining, consumption and future challenges. **Food Research International**, [s. l.], v. 137, p. 109311, 2020.
- CASTRO, T. **Obtenção da composição centesimal de farinha de larvas de *Tenebrio molitor***. 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2021.
- CHAKRABARTI, S. *et al.* Peptídeos bioativos derivados de alimentos na saúde humana: desafio e oportunidades. **Nutrients**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 1738, 2018.

- CHANTAWANNAKUL, P. From entomophagy to entomotherapy. **Frontiers in Bioscience-Landmark**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 179-200, 2020.
- CHEUNG, T. L.; DA SILVA, R. F. F.; PEREIRA, M. W. G. **Insetos para consumo humano: marketing impossível**. [s. l.]: [s. n.], 2018.
- CHEUNG, T. L.; MORAES, M. Inovação no setor de alimentos: insetos para consumo humano. **Interações**, Campo Grande, v. 17, n. 3, p. 503-515, 2016.
- CHOI, Y.-S. *et al.* Comparison of volatile compound profiles derived from various livestock protein alternatives including edible-insect, and plant-based proteins. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 441, p. 138337, 2024.
- CICATIELLO, C. *et al.* Consumer approach to insects as food: barriers and potential for consumption in Italy. **British Food Journal**, [s. l.], v. 118, n. 9, p. 2271-2286, 2016.
- COSTA-NETO, E. M.; RAMOS-ELORDUY, J.; PINO, J. M. Los insectos medicinales de Brasil: primeros resultados. **Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 395-414, 2006.
- D'ANTONIO, V. *et al.* Dietary modulation of oxidative stress from edible insects: a mini-review. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 8, p. 649557, 2021.
- DAI, C. *et al.* Angiotensin I-converting enzyme (ACE) inhibitory peptide derived from *Tenebrio molitor* (L.) larva protein hydrolysate. **European Food Research and Technology**, [s. l.], v. 236, p. 681-689, 2013.
- DAVID-BIRMAN, T. *et al.* Impact of silkworm pupae (*Bombyx mori*) powder on cream foaming, ice cream properties and palatability. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 75, p. 102874, 2022.
- DE CARVALHO, N. M. *et al.* Study of in vitro digestion of *Tenebrio molitor* flour for evaluation of its impact on the human

- gut microbiota. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 59, p. 101-109, 2019.
- DEFOLIART, G. R. An overview of the role of edible insects in preserving biodiversity. **Ecology of Food and Nutrition**, [s. l.], v. 36, n. 2-4, p. 109-132, 1997.
- DELICATO, C. *et al.* Consumers' perception of bakery products with insect fat as partial butter replacement. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 79, p. 103755, 2020.
- DESSA. **World population prospects 2022: summary of results**. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2022.
- DIGITAL FOOD LAB. **Bugfoundation**. [S. l.]: Digital Food Lab, 2022. Disponível em: <https://www.digitalfoodlab.com/en/foodtech-database/bugfoundation>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- DJOUADI, A. *et al.* Development of healthy protein-rich crackers using *Tenebrio molitor* flour. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 702, 2022.
- DOS SANTOS, F. R.; JUSTINO, H. de F. M.; JÚNIOR, B. R. de C. L. Insetos comestíveis: potencial lipídico. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 13, 2021.
- EFSA PANEL ON NUTRITION, NOVEL FOODS AND FOOD ALLERGENS. Safety of *Acheta domesticus* (house cricket) powder as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. **EFSA Journal**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 7043, 2022.
- FAO. **Edible insects: future prospects for food and feed security**. Roma: FAO, 2013.
- FAO. **How to feed the world in 2050?** Roma: FAO, 2009.
- FLORENÇA, S. G. *et al.* The motivations for consumption of edible insects: a systematic review. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 22, p. 3643, 2022.
- FONTES, V.; SANTOS, C.; HENRIQUE, V. S. M. Composição e aplicação da formiga Içá na culinária brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 4., 2018, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: UTFPR, 2018.

- GALLO, C. de C. **Características bromatológicas de formigas e cupins visando a alimentação de tamanduás criados em cativeiros**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.
- GIOTTO, G. *et al.* Cereal alimentício contendo alto teor de proteína advindo de farinhas de insetos. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. e5413144621, 2024.
- GLOVER, D.; SEXTON, A. **Edible insects and the future of food: a foresight scenario exercise on entomophagy and global food security**. England: Institute of Development Studies, 2015.
- GMUER, A. *et al.* Effects of the degree of processing of insect ingredients in snacks on expected emotional experiences and willingness to eat. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 54, p. 117-127, 2016.
- GONZÁLEZ, C. M.; GARZÓN, R.; ROSELL, C. M. Insects as ingredients for bakery goods: a comparison study of *H. illucens*, *A. domestica* and *T. molitor* flours. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 51, p. 205-210, 2019.
- HALL, F. *et al.* Effect of enzymatic hydrolysis on bioactive properties and allergenicity of cricket (*Gryllodes sigillatus*) protein. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 262, p. 39-47, 2018.
- HALLORAN, A.; FLORE, R.; MERCIER, C. Notes from the “insects in a gastronomic context” workshop in Bangkok, Thailand. **Journal of Insects as Food and Feed**, [s. l.], v. 1, p. 1-4, 2015.
- HENNIG, K. M.; DE SOUZA, N. E.; MASSAROLO, K. C. Estudo comparativo de funcionalidade de proteínas. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, [s. l.], v. 6, n. 13, p. 2160-2171, 2023.
- HO, I. *et al.* The crick-eatery: a novel approach to evaluate cricket (*Acheta domesticus*) powder replacement in food products through product eating experience and emotional response. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 24, p. 4115, 2022.

- HOUSE, J. Insects are not ‘the new sushi’: theories of practice and the acceptance of novel foods. **Social & Cultural Geography**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 702-723, 2018.
- IMATHIU, S. Benefits and food safety concerns associated with consumption of edible insects. **NFS Journal**, [s. l.], v. 18, p. 1-11, 2020.
- JEON, Y.-H. *et al.* Physicochemical properties and oxidative stabilities of mealworm (*Tenebrio molitor*) oils under different roasting conditions. **Food Science and Biotechnology**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 105-110, 2016.
- JONGEMA, Y. **List of edible insect species of the world**. Wageningen: Laboratory of Entomology, Wageningen University, 2012.
- JONGEMA, Y. **List of edible insects of the world**. Wageningen: Department of Entomology, Wageningen University & Research, 2017.
- KIM, H.-W. *et al.* Pre-treated mealworm larvae and silkworm pupae as a novel protein ingredient in emulsion sausages. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 38, p. 116-123, 2016.
- KINYURU, J. N. *et al.* Nutrient composition of four species of winged termites consumed in western Kenya. **Journal of Food Composition and Analysis**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 120-124, 2013.
- KOIN, N. L. *et al.* Identificação e quantificação do perfil dos ácidos graxos de insetos por Bligh Dyer como fonte alternativa de alimento. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INSETOS ALIMENTÍCIOS E TECNOLOGIAS ASSOCIADAS*, 1.; *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ANTROPOENTOMOFAGIA*, 2., 2019, Montes Claros. **Anais [...]**. Montes Claros: IFNMG, 2019.
- KRONGDANG, S. *et al.* Edible insects in Thailand: an overview of status, properties, processing, and utilization in the food industry. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2162, 2023.

- KUNTADI, K. *et al.* Nutritional compositions of six edible insects in java. **Indonesian Journal of Forestry Research**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 57-68, 2018.
- LENSVELT, E. J. S.; STEENBEKKERS, L. P. A. Exploring consumer acceptance of entomophagy: a survey and experiment in Australia and the Netherlands. **Ecology of Food and Nutrition**, [s. l.], v. 53, n. 5, p. 543-561, 2014.
- LIANG, R. *et al.* Intracellular antioxidant activity and apoptosis inhibition capacity of PEF-treated KDHCH in HepG2 cells. **Food Research International**, [s. l.], v. 121, p. 336-347, 2019.
- MACEDO, I. M. E. *et al.* Entomophagy in different food cultures | Entomofagia em diferentes culturas alimentares. **Revista Geama**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 58-62, 2017.
- MACEDO, R. M. *et al.* Insetos na alimentação humana: avaliação sensorial de barras de cereais com *Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758. **Acta Biologica Brasiliensia**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 75-86, 2022.
- MARQUES, C. G. *et al.* Proteínas alternativas como ingrediente de enriquecimento de alimentos: uma revisão da larva de tenébrio comum (*Tenebrio molitor*). **Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil**, [s. l.], v. 2, p. 79-97, 2021.
- MASON, J. B. *et al.* Fostering strategies to expand the consumption of edible insects: the value of a tripartite coalition between academia, industry, and government. **Current Developments in Nutrition**, [s. l.], v. 2, n. 8, p. 1-5, 2018.
- MATOS, F. M. de; CASTRO, R. J. S. de. Insetos comestíveis como potenciais fontes de proteínas para obtenção de peptídeos bioativos. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 24, p. e2020044, 2021.
- MEGIDO, R. C. *et al.* Consumer acceptance of insect-based alternative meat products in Western countries. **Food Quality and Preference**, [s. l.], v. 52, p. 237-243, 2016.
- MINTAH, B. K. *et al.* Effect of sonication pretreatment parameters and their optimization on the antioxidant activity of *Hermetia*

- illucens* larvae meal protein hydrolysates. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. e14081, 2019.
- MISHYNA, M. *et al.* Extração, caracterização e propriedades funcionais de proteínas solúveis de gafanhoto comestível (*Schistocerca gregaria*) e abelha (*Apis mellifera*). **Food Research International**, [s. l.], v. 116, p. 697-706, 2019.
- MORAES, B.; FERNANDES, L. O promissor mercado de insetos comestíveis. **Com Ciência**, Campinas, n. 202, 2018.
- MWANGI, M. *et al.* Insects as sources of iron and zinc in human nutrition. **Nutrition Research Reviews**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 248-255, 2018.
- NONGONIERMA, A.; FITZGERALD, R. Unlocking the biological potential of proteins from edible insects through enzymatic hydrolysis: a review. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 43, p. 239-252, 2017.
- NOWAK, V. *et al.* Review of food composition data for edible insects. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 193, p. 39-46, 2016.
- OMOTOSO, O. Nutritional quality, functional properties and anti-nutrient compositions of the larva of *Cirina forda* (Westwood) (Lepidoptera: Saturniidae). **Journal of Zhejiang University Science B**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 51-55, 2006.
- OMUSE, E. *et al.* O atlas global de insetos comestíveis: análise da diversidade e da comunalidade contribuindo para os sistemas alimentares e a sustentabilidade. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 5045, 2024.
- OONINCX, D. G. A. B. *et al.* An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. **PLoS One**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. e14445, 2010.
- PEDROSO, M. A. P. *et al.* Teor de proteína: *Tenebrio molitor* & *Chrysodeixis includens*. **Open Science Research III**, [s. l.], v. 3, p. 115-125, 2022.

- PHILIPPI, S. T.; AQUINO, R. de C. **Dietética**: princípios para o planejamento de uma alimentação saudável. São Paulo: Manole, 2015.
- PORTUGAL BUGS. **Portugal Bugs**: produtos. [S. l.]: Portugal Bugs, 2019. Disponível em: <https://portugalbugs.pt/>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- PRADO, S. de P. T. *et al.* Contaminação microscópica por matérias estranhas em noz-moscada, cúrcuma, gengibre, colorífico, pimenta-do-reino e páprica comercializados no estado de São Paulo, Brasil (Parte I). **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 80, p. e37291, 2021.
- RAHEEM, D. *et al.* Entomophagy: nutritional, ecological, safety and legislation aspects. **Food Research International**, [s. l.], v. 117, p. 422-439, 2019.
- RAMOS-ELORDUY, J. Insects: a hopeful food source. *In*: PAOLETTI, M. G. (ed.). **Ecological implications of minilivestock**: role of rodents, frogs, snails, and insects for sustainable development. New Hampshire: Science Publishers, 2015.
- RAMOS-ELORDUY, J. Insects: a hopeful food source. *In*: PAOLETTI, M. G. (ed.). **Ecological implications of minilivestock**. New Hampshire: Science Publishers, 2005. p. 263-291.
- RODRIGUES, G. Altamente proteicos, insetos começam a entrar no cardápio. **O Tempo**, Belo Horizonte, 15 jul. 2019. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/interessa/altamente-proteicos-insetos-comecam-a-entrar-no-cardapio-1.2209526>. Acesso em: 16 fev. 2025.
- ROMEIRO, E. T.; OLIVEIRA, I. D. de; CARVALHO, E. F. Insetos como alternativa alimentar: artigo de revisão. **Revista de Comportamento, Cultura e Sociedade**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 41-61, 2015.
- RONCOLINI, A. *et al.* Protein fortification with mealworm (*Tenebrio molitor* L.) powder: effect on textural, microbiological,

- nutritional and sensory features of bread. **PLoS One**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. e0211747, 2019.
- ROOS, N. Insetos e nutrição humana. *In*: HALLORAN, A. *et al.* (eds.). **Insetos comestíveis em sistemas alimentares sustentáveis**. Cham: Springer, 2018. cap. 5, p. 83-91.
- RUBY, M. B.; ROZIN, P.; CHAN, C. Determinants of willingness to eat insects in the USA and India. **Journal of Insects as Food and Feed**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 215-226, 2015.
- RUMPOLD, B. A.; SCHLÜTER, O. K. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. **Molecular Nutrition & Food Research**, [s. l.], v. 57, n. 5, p. 802-823, 2013.
- RUSSELL, P. S.; KNOTT, G. Encouraging sustainable insect-based diets: the role of disgust, social influence, and moral concern in insect consumption. **Appetite**, [s. l.], v. 166, p. 105437, 2021.
- RYDER, K. *et al.* Towards generation of bioactive peptides from meat industry waste proteins: generation of peptides using commercial microbial proteases. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 208, p. 42-50, 2016.
- SANTOS, F. R. *et al.* Insetos comestíveis: potencial lipídico. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 13, 2021.
- SANTOS, J. da C. dos. **Avaliação do potencial nutricional e funcional de insetos comestíveis**: uma alternativa inovadora para o setor de alimentos. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência de Alimentos) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.
- SCHARDONG, I. S. *et al.* Brazilian consumers' perception of edible insects. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 10, p. e20180960, 2019.
- SENA, M. Tem formiga no prato: o sucesso das tanajuras e outros insetos na culinária. **Folha de Pernambuco**, Recife, 25 out. 2021.

- SOGARI, G. *et al.* Entomophagy and Italian consumers: an exploratory analysis. **Progress in Nutrition**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 311-316, 2015.
- SOGARI, G.; BOGUEVA, D.; MARINOVA, D. Australian consumers' response to insects as food. **Agriculture**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 108, 2019.
- SOGARI, G.; MENOZZI, D.; MORA, C. Sensory-liking expectations and perceptions of processed and unprocessed insect products. **International Journal on Food System Dynamics**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 314-320, 2018.
- SUN-WATERHOUSE, D. *et al.* Transforming insect biomass into consumer wellness foods: a review. **Food Research International**, [s. l.], v. 89, p. 129-151, 2016.
- TANGA, C.; EKESI, S. Dietary and therapeutic benefits of edible insects: a global perspective. **Annual Review of Entomology**, [s. l.], v. 69, p. 209-232, 2024.
- TUNES, S. Insetos comestíveis. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 21, n. 290, p. 60-67, 2020.
- U. S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). **Regulatory framework for substances intended for use in human food or animal food on the basis of the generally recognized as safe (GRAS) provision of the federal food, drug, and cosmetic act**: guidance for industry. [S. l.]: FDA, 2017.
- UFOODIN. **Cricket powder flour**. [S. l.]: Ufoodin, 2022. Disponível em: <https://ufoodin.com/pt/product/cricket-powder-flour/>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- VAN DER SPIEGEL, M.; NOORDAM, M.; VAN DER FELS-KLERX, H. Safety of novel protein sources (insects, microalgae, seaweed, duckweed, and rapeseed) and legislative aspects for their application in food and feed production. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 662-678, 2013.

- VAN HUIS, A. *et al.* **Edible insects**: future prospects for food and feed security. Roma: FAO, 2013.
- VELDKAMP, T. *et al.* Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets – a feasibility study. **Livestock Research**, [s. l], v. 12, n. 1, p. 49, 2012.
- VERBEKE, W. Profiling consumers who are ready to adopt insects as a meat substitute in a Western society. **Food Quality and Preference**, [s. l], v. 39, p. 147-155, 2015.
- WENDIN, K.; OLSSON, V.; LANGTON, M. Mealworms as food ingredient—sensory investigation of a model system. **Foods**, [s. l], v. 8, n. 8, p. 319, 2019.
- WILKINSON, K. *et al.* Australian consumers' awareness and acceptance of insects as food. **Insects**, [s. l], v. 9, n. 2, p. 44, 2018.
- WOMENI, H. *et al.* Oils of insects and larvae consumed in Africa: potential sources of polyunsaturated fatty acids. **Oléagineux, Corps Gras, Lipides**, [s. l], v. 16, n. 4, p. 230-235, 2009.
- WOOLF, E. *et al.* Willingness to consume insect-containing foods: a survey in the United States. **LWT**, [s. l], v. 102, p. 100-105, 2019.
- YI, L. *et al.* Extraction and characterization of protein fractions from five insect species. **Food Chemistry**, [s. l], v. 141, n. 4, p. 3341-3348, 2013.
- ZIELIŃSKA, E. *et al.* Selected species of edible insects as a source of nutrient composition. **Food Research International**, [s. l], v. 77, p. 460-466, 2015.
- ZIELIŃSKA, E.; PANKIEWICZ, U.; SUJKA, M. Nutritional, physiochemical, and biological value of muffins enriched with edible insects flour. **Antioxidants**, [s. l], v. 10, n. 7, p. 1122, 2020.

Kombucha: aspectos tecnológicos, sensoriais e funcionais

Gabrielly Cristine Lamão Pontes • Thauan Oliveira Costa •

Paola Zava Lorencini • Karolini Zuqui Nunes •

Bárbara Morandi Lepaus • Daniel Sgrancio Uliana •

Jackline Freitas Brilhante de São José

A Kombucha é considerada uma bebida milenar tradicionalmente preparada pela fermentação de chá-preto ou chá-verde adoçado, com a participação de uma cultura simbiótica de bactérias e leveduras, do inglês *Symbiotic Culture of Bacteria and Yeasts (SCOBY)* (DIEZ-O-ZAETA; ASTIAZARAN, 2022). Esses microrganismos são responsáveis pelas interações durante um processo simbiótico produzindo metabólitos como ácidos (acético, glucônico, glicurônico, cítrico), vitaminas hidrossolúveis (B1, B2, B6, B12 e C), etanol, dióxido de carbono e celulose (VILLARREAL-SOTO *et al.*, 2018). Tradicionalmente, o chá é feito com folhas de *Camellia sinensis*, como o chá-preto, chá-verde e *chá oolong* (ANTOLAK; PIECHOTA; KUCHARSKA, 2021). O método de produção ocorre por meio de respiração aeróbica e fermentação anaeróbica, podendo ou não conter teor alcoólico

no produto final (MAPA, 2019). Ao final do processo, obtém-se uma bebida que pode conter sabor frutado, herbal, avinagrado, de chá, azedo, que varia de acordo com a forma de preparo (ANANTA-CHOKE *et al.*, 2023).

A Kombucha popularizou-se por ser uma bebida refrescante e considerada como desintoxicante, por volta de 220 a.C., em Manchúria, na China (JAYABALAN *et al.*, 2014). Em 414 d.C., a bebida chegou ao Japão por meio do médico Kombu, logo, a bebida recebeu o nome de Kombucha como forma de homenagem (JÚNIOR *et al.*, 2022). Posteriormente à Segunda Guerra Mundial, com as rotas comerciais, a Kombucha ganhou popularidade em outras regiões, como na Rússia, Alemanha, França e no continente africano (JAYABALAN *et al.*, 2014).

Atualmente, a bebida vem ganhando destaque, tanto na área de alimentos e bebidas quanto na literatura científica. Em relação ao primeiro aspecto, percebe-se que há um interesse crescente por dietas mais equilibradas e o envelhecimento saudável, fatores que tornaram popular a elaboração de alimentos e bebidas fermentadas, como o Kombucha (MELO *et al.*, 2024). Assim, a busca por bebidas mais saudáveis e com possível alegação de funcionalidade, tem estimulado pesquisas científicas com Kombucha. Nos últimos anos, o número de publicações sobre Kombucha tem crescido significativamente. As pesquisas mais recorrentes abordam os benefícios à saúde, a formação da cultura simbiótica de bactérias e leveduras e técnicas de aprimoramento da bebida, com ênfase na busca por sabores mais agradáveis e em seu potencial para promover a saúde (ANTOLAK; PIECHOTA; KUCHARSKA, 2021).

O mercado de Kombucha tem impulsionado uma taxa de crescimento anual de 19,7% no mercado global (LEI *et al.*, 2025). Projeções indicam que, até 2025, o valor do mercado global de Kombucha deverá alcançar até 5 bilhões de dólares, com estimativas apontando para 5,9 bilhões de dólares até 2029 (MELO *et al.*, 2024; KITWETCHAROEN *et al.*, 2025). Atualmente, existem mais de 200 variedades distintas desta bebida disponíveis em todo o mundo (MELO *et al.*,

2024). O aumento da popularidade do Kombucha está relacionado aos possíveis benefícios à saúde, relacionados ao sistema imunológico, auxiliando na perda de peso e efeitos sobre a pressão arterial. No entanto, a maioria dessas alegações ainda carece de evidências científicas (NYHAN *et al.*, 2022). Além disso, é importante destacar que a crescente popularidade do Kombucha como um produto considerado como saudável, resultou em um estímulo à fabricação caseira da bebida. Entretanto, na literatura existem registros relacionados a toxicidade da bebida, dependendo da quantidade consumida e do processo de produção executado. Assim, é fundamental conhecer os processos tecnológicos envolvidos na produção da Kombucha de forma adequada e também reconhecer as propriedades funcionais da bebida.

Desta forma, o objetivo do presente capítulo é explorar e analisar os aspectos tecnológicos envolvidos no processo de produção do Kombucha, avaliar as características sensoriais desse produto e abordar os potenciais benefícios funcionais.

Aspectos tecnológicos e fatores que influenciam as características da Kombucha

Preparo da Kombucha

Kombucha está entre as principais bebidas fermentadas que têm sido consumidas. De acordo com registros na literatura, as receitas desta bebida podem variar muito desde a quantidade e tipo de chá usado, até a quantidade de açúcar adicionado, cultura inicial, tempo e temperatura de fermentação (BISHOP *et al.*, 2022). A infusão vegetal mais utilizada em estudos de Kombucha é o chá-preto, mas o uso do chá-verde vem ganhando mais espaço em produções comerciais, possivelmente devido ao seu sabor suave e menor preço (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

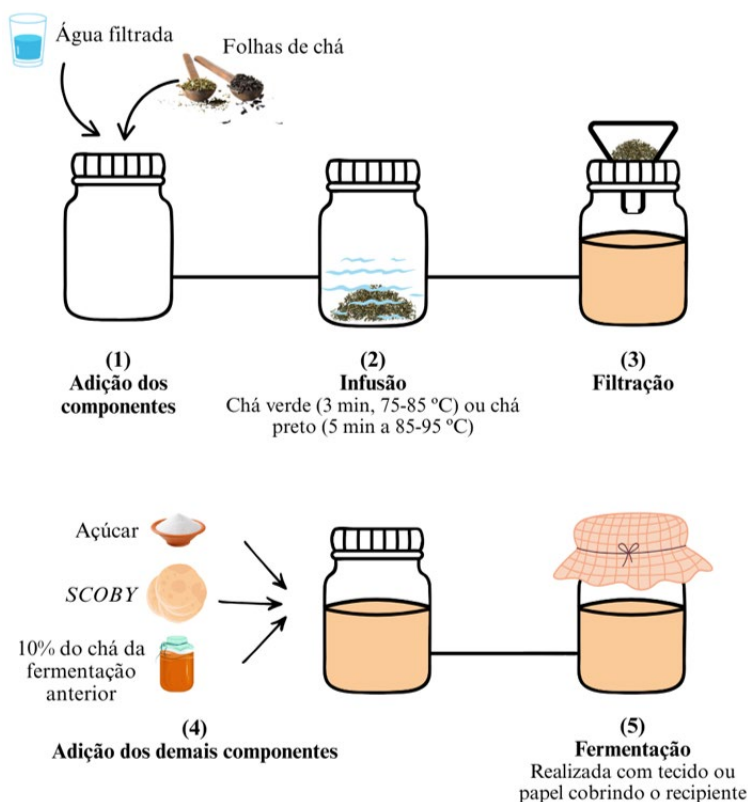
As etapas de preparo do Kombucha estão apresentadas na Figura 1. Tradicionalmente, primeiro, prepara-se o chá por meio da infusão

das folhas por um período que pode variar de 5 a 10 minutos. Posteriormente, cerca de 50–150 g/L (5–15% p/v) de açúcar é adicionado à solução de chá quente. Feito isso, o material deve alcançar temperatura ambiente e ser transferido para um recipiente de vidro esterilizado. Por fim, a *SCOBY* deve ser adicionada junto com 100–200 mL de um lote previamente fermentado de Kombucha, para inocular o novo lote (BISHOP *et al.*, 2022; NORONHA *et al.*, 2022).

Figura 1: Fluxograma de elaboração de Kombucha.

SCOBY: Symbiotic Culture Of Bacteria and Yeast

(cultura simbiótica de bactérias e leveduras)



Fonte: Elaborado pelos autores.

A adição do Kombucha previamente fermentado ocasionará a redução do pH inicial da solução do chá, de modo a auxiliar na inibição do crescimento de microrganismos deterioradores e patogênicos. Ao final, a mistura de Kombucha deve então ser coberta com um pano ou uma toalha limpa para evitar contaminação e deixada fermentar em temperatura ambiente (18–30 °C) por 7 a 10 dias (BISHOP *et al.*, 2022).

A produção de Kombucha é um processo biotecnológico influenciado por múltiplos fatores, que determinam as características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais da bebida produzida. Fatores como seleção das matérias-primas e condições de fermentação desempenham um papel crucial na qualidade final do produto, demandando controle e otimização para garantia dos padrões de segurança, funcionalidade e aceitação sensorial desejadas (DARTORA *et al.*, 2023b).

Condições de infusão

Há registros na literatura de diferentes formas de preparar a infusão do chá. Em um estudo realizado por Cardoso *et al.* (2020), a infusão de chá-verde foi realizada a 75 °C por 2 minutos, enquanto o chá-preto foi infundido à 95 °C por 4 minutos. Os autores identificaram um total de 127 compostos fenólicos, sendo em sua maioria flavonoides, seguido dos ácidos fenólicos. Dos 10 compostos mais abundantes, 6 deles eram frequentes em ambos os chás. Por outro lado, Kowalska *et al.* (2021) observaram melhor extração de compostos fenólicos no chá-verde ao utilizar a temperatura de 65 °C e o tempo de infusão de 5 minutos, e menor concentração destes ao utilizar infusão por 10 minutos. Enquanto ao aplicar a temperatura de 100 °C obteve-se maior quantidade de polifenóis em 10 minutos de infusão. Em estudo desenvolvido por Meng *et al.* (2024), ao preparar o chá-preto com infusão de 100 °C por 10 minutos foram identificados 78 compostos os quais contribuem para o perfil sensorial do Kombucha. Entre esses compostos, destaca-se a presença de terpenos, uma

classe de metabólitos secundários conhecidos por conferir aroma frutado, floral e doce ao chá.

Geralmente, o chá-preto é colocado em infusão em temperatura elevada, entre 90 e 100 °C, por 2 a 5 minutos, enquanto o chá-verde é submetido a infusão em temperaturas mais baixas, que podem variar entre 66 e 85 °C (BISHOP *et al.*, 2022). Dessa forma, as variações de temperaturas aplicadas durante a infusão podem influenciar nas características da bebida. Por exemplo, Dartora *et al.* (2023b) preparou infusão de chás verde e preto a 95 °C por 5 min, e os avaliadores caracterizaram a bebida por apresentar sabor de vinagre, cítrico, ácido, porém com tons de azedo e amargo. Isso ocorre devido à alta concentração de polifenóis, como os taninos e flavonoides, que são suscetíveis a altas temperaturas, semelhante à que foi utilizada para o preparo da infusão (YE *et al.*, 2022).

De acordo com Liu *et al.* (2018), em temperaturas elevadas de infusão o chá-verde apresenta sabor amargo e adstringente, enquanto menores temperaturas e tempo de infusão conferem sabor adocicado e umami à bebida, proporcionando maior aceitação. Assim, para preservar as características sensoriais do chá-verde é recomendado que a temperatura de infusão não ultrapasse 85 °C e 3 min, pois quando as folhas de chá são submetidas a altas temperaturas ocorre a degradação das epicatequinas e aumento da extração de polifenóis, sendo estes relacionados à sensação amarga e de adstringência do produto (LIU *et al.*, 2024).

Adição da SCOBY

SCOBY é uma cultura simbiótica de bactérias e leveduras presentes em um biofilme. Durante a produção de Kombucha é comum adicionar a SCOBY e parte do líquido fermentado produzido no lote anterior (cerca de 10%) ao chá adoçado (LEONARSKI *et al.*, 2022). O termo foi criado para distinguir a nova cultura formada no Kombucha de sua cultura mãe. O biofilme saudável não deve ser muito

fino e nem muito espesso, devendo apresentar entre 6 e 12 mm de espessura, cor que varia de branco a marrom-claro. Alterações nesse padrão podem indicar contaminação. *SCOBY* saudáveis sempre produzirão novas culturas e serão resistentes ao rasgo quando pressionados entre o polegar e o indicador (SOARES; DE LIMA; REOLON SCHMIDT, 2021).

Como as bactérias acéticas produzem celulose, as bactérias e outros microrganismos ficam parcialmente imobilizados na estrutura do biofilme. Consequentemente, há maior quantidade de microrganismos. Por outro lado, ao utilizar o inóculo do lote anterior pode ocorrer diminuição do pH, alcançando valores de 4,2, que auxiliam no controle de crescimento de patógenos. No entanto, pode haver atividade microbiológica capaz de iniciar o processo de fermentação. Consequentemente, usar maiores quantidades de inóculo pode ocasionar acidez excessiva ao novo lote de fermentação, causando menor qualidade do produto final, sem ganhos de produtividade ao longo do tempo (LEONARSKI *et al.*, 2022).

Condições de fermentação

Considerando que as leveduras e bactérias envolvidas no processo de fermentação do Kombucha possuem diferentes temperaturas ótimas para crescimento, conduzir a fermentação em diferentes condições pode produzir diferenças significativas na composição química do produto produzido (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Além da temperatura, fatores como pH, quantidade de oxigênio no início do processo fermentativo, quantidade de CO₂ dissolvido, taxa de cisalhamento no fermentador e concentração do substrato de fermentação também podem influenciar importantes características como sabor, aroma, propriedades físico-químicas e nutricionais da bebida (BISHOP *et al.*, 2022).

Uma grande variedade de bactérias e leveduras são encontradas tanto na *SCOBY* quanto no líquido. Entre as bactérias presentes

destacam-se as bactérias de ácido acético (BAA), como *Acetobacter* e *Glucobacter*, bactérias de ácido láctico (BAL) como *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, e leveduras (WANG *et al.*, 2022). Em relação às leveduras presentes na bebida, destacam-se as do gênero *Zygosaccharomyces*, *Candida*, *Kloeckera/Hanseniaspora*, *Pichia*, *Brettanomyces/Dekkera*, *Saccharomyces*, *Lachancea*, *Saccharomycoides*, *Schizosaccharomyces* e *Kluyveromyces* (VILLARREAL-SOTO *et al.*, 2018). Entretanto, a composição e variedade de microrganismos presentes podem sofrer alterações, podendo estar relacionados à origem da cultura simbiótica e aspectos no processo de produção como pH, temperatura, tempo de fermentação e modo de preparo (GRASSI *et al.*, 2022).

Bactérias e leveduras da *SCOBY* utilizam os açúcares por meio da enzima invertase e produzem etanol, estimulando o crescimento de BAA, que utilizam glicose como substrato para produzir ácido glucônico e o etanol para produzir ácido acético. A primeira etapa da fermentação é denominada aeróbica, pois é necessário a presença de oxigênio para o crescimento e atividade das BAA presentes. Com isso, utiliza-se um obstáculo como papel toalha ou tecido que permita a passagem do ar e impeça a passagem de sujidades e microrganismos que contaminem a bebida (SOARES; DE LIMA; REOLON SCHMIDT, 2021).

À medida que a fermentação prossegue, ocorre a formação de uma nova película de celulose gelatinosa com espessuras de 8 a 12 milímetros na superfície superior do recipiente. Essa película é nada mais nada menos que uma nova *SCOBY* (LAAVANYA; SHIRKOLE; BALASUBRAMANIAN, 2021; SOARES; DE LIMA; REOLON SCHMIDT, 2021). Além disso, a composição da fase líquida sofre alterações à medida que o nível de açúcar e o pH diminuem, e a acidez aumenta, em razão da ação simbiótica entre as bactérias iniciadoras e o inóculo (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Nesta etapa, também ocorre a produção de álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, açúcares, vitaminas, aminoácidos, lipídios, proteínas, polifenóis, minerais e outros compostos que contribuem para características nutricionais e sensoriais

da bebida (BORTOLOMEDI; PAGLARINI; BROD, 2022; DARTORA *et al.*, 2023b; VILLARREAL-SOTO *et al.*, 2018).

Por esse motivo, como há variação quanto aos tipos de metabólitos produzidos durante a fermentação do Kombucha, a escolha do tempo muitas vezes vai depender da composição e do perfil sensorial desejados, além de limitações na aceitação e na segurança do consumo (BISHOP *et al.*, 2022). Além disso, durante a fermentação, ocorre um aumento na concentração de BAA, porém, os níveis de etanol e sacarose que estão aumentados no início da fermentação podem diminuir ao longo do tempo (ANDRESON *et al.*, 2023).

Após a primeira fermentação (aeróbica), ocorre a fermentação anaeróbica, na qual a bebida é engarrafada e mantida sob refrigeração. Neste processo, além da produção de CO₂, também descrito como gás carbônico, há a modificação das características sensoriais da bebida (FABRICIO *et al.*, 2022). Essa mudança ocorre devido à produção de ésteres e ácidos voláteis, derivados do metabolismo microbiano durante a fermentação, que pode gerar substâncias com aroma frutado, por exemplo (SOARES; DE LIMA; REOLON SCHMIDT, 2021).

O tempo de fermentação para produção do Kombucha pode variar de 7 a 60 dias, mas em média são utilizados 15 dias para realizar este processo. Assim, as variações da atividade dependem da cultura inicial e da duração da fermentação, o que impactará nos tipos de metabólitos produzidos (BISHOP *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022). Embora o aumento do tempo de fermentação do Kombucha resulte em uma concentração maior de compostos antioxidantes, prolongar o tempo de fermentação não é o mais apropriado, pois se pode alcançar níveis potencialmente prejudiciais de ácidos orgânicos para consumo direto (BISHOP *et al.*, 2022). Além disso, a quantidade elevada desses ácidos pode criar um ambiente desfavorável para a sobrevivência dos microrganismos, devido à toxicidade que pode apresentar à microbiota. Portanto, o tempo de fermentação não determina apenas a concentração e os tipos de nutrientes produzidos

pelos microrganismos, mas também impactará os compostos de sabor e aroma produzido (BISHOP *et al.*, 2022).

Como exemplo disso Dartora *et al.* (2023b) demonstraram que o tempo de fermentação impactou nos níveis de etanol da bebida, em que a concentração aumentou até o sétimo dia de cultivo, excedendo o limite de 0,5% no 4º dia. Além disso, diferentes tempos de fermentação favoreceram a formação de perfis aromáticos distintos, incluindo notas verdes e acéticas. Esse fenômeno ocorre, pois a concentração de compostos voláteis é modificada progressivamente durante a fermentação, em função da dinâmica populacional do microbioma e de suas atividades metabólicas diferenciadas, impactando diretamente as características sensoriais da bebida (YAO *et al.*, 2023).

Além do tempo de fermentação, a temperatura também é um fator importante que deve ser monitorado para alcançar os objetivos desejados. Um estudo demonstrou que temperaturas mais elevadas de fermentação (30 °C) contribuíram para menor apreciação da bebida, enquanto temperaturas mais baixas (20 °C) proporcionaram maior aceitação (COHEN; SELA; NOLDEN, 2023). Além disso, estudos avaliaram o tratamento térmico de Kombucha e verificaram que qualidade pode ser afetada em função da temperatura. Em tratamentos realizados com temperatura de até 70 °C não houve mudança no sabor e gosto da bebida, enquanto em temperaturas mais elevadas houve a mudança no sabor, gosto e conferindo cor mais escura (JAYABALAN *et al.*, 2008). Ademais, o tipo de chá e o tempo de fermentação podem influenciar na concentração de micronutrientes presente no chá (JAKUBCZYK *et al.*, 2022).

Cabe ressaltar que não existe uma padronização para as proporções dos ingredientes na elaboração do Kombucha, resultando em ampla variação nas formulações reportadas na literatura. Conforme demonstrado por Miranda *et al.* (2022), há registros de que o Kombucha tradicional, produzido com substrato de *Camellia sinensis*, já foi elaborado com variações significativas nos parâmetros de preparo, sendo concentração de chá (1,5-12 g/L), teor de sacarose (30-100

g/L), volume de inóculo (3-10% v/v) e duração da fermentação (7-18 dias). Todas essas variações podem impactar em importantes características da bebida, como composição microbiológica, propriedade funcional e aceitabilidade (BISHOP *et al.*, 2022). Por exemplo, Zofia *et al.* (2020) observaram correlação positiva entre tempo de fermentação e teor de compostos bioativos, com aumento progressivo de fenóis totais ao longo do tempo de fermentação. Além disso, a seleção e proporção do substrato determinam o perfil de metabólitos secundários, com diferenças significativas entre chás tradicionais e matrizes não convencionais (BORTOLOMEDI; PAGLARINI; BROD, 2022).

Substratos alternativos para a produção de Kombucha

Além do tradicional chá-preto e verde, pesquisas têm explorado substratos alternativos para a produção de Kombucha, com o intuito de diversificar propriedades sensoriais, incrementar valor nutricional ou adaptar-se a matérias-primas regionais (FILIPPIS *et al.*, 2018; NYHAN *et al.*, 2022; SALES *et al.*, 2023). Estes novos meios de cultivo, que incluem infusões de outras plantas e diferentes fontes de carboidratos, por exemplo, podem modificar o perfil fermentativo da *SCOBY*, a composição de metabólitos bioativos e as características sensoriais da bebida (LEONARSKI *et al.*, 2022).

Por esse motivo, o uso de substratos alternativos para produção de Kombucha, como camomila, hibisco e capim-limão, conhecidos por suas propriedades benéficas à saúde, pode contribuir positivamente para incrementar os teores de compostos bioativos e propriedades antioxidantes e antimicrobianas da bebida (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Uma adição que se mostrou promissora foi a utilização de umbu cajá e a pitanga, frutas enriquecidas na fermentação, que contribuíram para a aparição de compostos voláteis da classe terpenos, que favorecem aromas florais e frutados para o Kombucha (SILVA *et al.*, 2021a).

Além disso, diferentes fontes alternativas de açúcares têm sido exploradas, como o açúcar de coco e o de cana. O açúcar de coco demonstrou maior atividade antimicrobiana e menor redução no teor de açúcar no final da fermentação, enquanto o açúcar de cana obteve melhor aceitabilidade e apresentou sabor mais adocicado (KLUZ *et al.*, 2022). O mel também foi avaliado como possível substituto ao açúcar e sua utilização resultou em uma bebida com características semelhantes ao Kombucha tradicional, preservando a cor do produto (SANTOS *et al.*, 2024). O uso combinado de mel Apis e erva-mate como substratos alternativos aumentou significativamente os teores de compostos fenólicos totais, resultando em uma bebida com coloração atrativa e boa aceitação sensorial. No entanto, os autores destacaram o tempo máximo de fermentação em 20 dias, para evitar acidez excessiva no produto final (SANTOS *et al.*, 2024).

Os itens mencionados nesta seção deixa claro que todos os aspectos de processamento do Kombucha (formulação, condições fermentativas e tempo) atuam na definição das propriedades físico-químicas (acidez, teor de compostos bioativos) e características sensoriais (aroma, sabor, aceitação) da bebida, reiterando a importância do controle rigoroso dessas variáveis para garantia da qualidade do produto.

Aspectos sensoriais do Kombucha

O Kombucha vem ganhando cada vez mais popularidade, devido aos seus efeitos promotores de saúde, como propriedades probióticas e antioxidantes (SADOK *et al.*, 2025). Somado a isso, a bebida resultante da fermentação apresenta características singulares, como sabor cítrico, agridoce ou avinagrado, além de refrescante, baixa acidez, podendo possuir ou não teor alcoólico e ser levemente carbonatada. Todas essas características fazem com que essa bebida ganhe cada vez mais a atenção dos consumidores, que buscam opções mais saudáveis

às bebidas gaseificadas tradicionais (CAVICCHIA; ALMEIDA, 2023; LEONARSKI *et al.*, 2022).

Alguns fatores como a qualidade da água, condições do chá, tipo de açúcar, natureza do inóculo, temperatura e o diâmetro do vidro utilizado podem modificar as características sensoriais da bebida produzida (TRAN *et al.*, 2020), reduzindo a sua aceitabilidade. Parâmetros como cor, sabor e aroma são aspectos essenciais para a aceitação sensorial e devem ser considerados no desenvolvimento de novos produtos. Essas características podem ser exploradas, por exemplo, considerando se a bebida apresenta turbidez aparente, coloração não usual, se há equilíbrio entre os aromas, com predominância do floral, frutado, medicinal, herbal, e se o sabor possui aspecto de refrescância, ácido, doce, equilibrado ou intenso (ZHANG *et al.*, 2021).

Um estudo realizado por Zou *et al.* (2021), utilizou chá de *Zijuan* (*Camellia sinensis* var. *assamica*), um tipo de chá rico em antocianinas, cultivado na China para produzir o Kombucha. Devido ao pH naturalmente mais ácido do meio de fermentação, a coloração da bebida passou de marrom-amarelado para rosa-salmão, porque as antocianinas apresentam coloração avermelhada em condições ácidas. Além disso, a bebida proposta apresentou maior aceitação geral, capacidade antioxidante e concentração de voláteis quando comparada às preparadas com chá-preto e chá-verde.

Conforme já mencionado, o tipo de chá utilizado influencia diretamente os atributos da bebida. Isso ocorre, pois os compostos presentes na matriz do chá interagem de maneira distinta com os demais componentes da bebida. Por exemplo, ao utilizar chá-preto, chá-verde e erva-mate na produção de Kombucha, Dartora *et al.* (2023¹⁹) observaram que a bebida de chá-verde apresentou valores mais altos de ácido acético mais baixos de etanol, possivelmente devido ao consumo do etanol produzido pelas leveduras pelas bactérias acéticas da *SCOBY* (ativadas pelo chá-verde), convertendo-o em ácido acético. Por esse motivo, a Kombucha de chá-verde apresentou acidez, aroma e sabores mais ácidos, diferente das demais bebidas.

Um estudo demonstrou que houve maior aceitabilidade do Kombucha de chá *Fubrik* no 7º dia de fermentação, período em que foi observado uma alteração na cor da bebida, desenvolvimento de sabor frutado, baixa acidez e sabor levemente avinagrado (WU *et al.*, 2023). Por outro lado, Cohen *et al.* (2023) perceberam que a temperatura foi o principal parâmetro que implicou na aceitabilidade da bebida, com maior preferência no Kombucha fermentado em temperaturas mais baixas, pois em temperaturas elevadas, resultou em uma bebida de sabor avinagrado, adstringente e com maior acidez.

Outro estudo realizado, comparando o Kombucha tradicional com Kombucha a base de ervas, verificou que o substrato de hortelã proporcionou uma bebida refrescante, doce e com a acidez mais agradável ao se comparar com o substrato tradicional, chá branco, crisântemo e madressilva, apresentando maior pontuação na análise sensorial da bebida (ZHANG *et al.*, 2021). A cenoura preta adquirida na Turquia também foi testada como substrato alternativo e obteve aprovação, pois resultou uma bebida de sabor agradável, conforme resultado da análise sensorial (YILDIZ; GULDAS; GURBUZ, 2020).

Propriedades Funcionais

Os compostos provenientes do chá e os subprodutos da fermentação são os responsáveis por trazerem benefícios para saúde, estudos *in vitro* e *in vitro* evidenciam esses benefícios (KAPP; SUMNER, 2019). As folhas de chá são compostas por proteínas, como enzimas e aminoácidos, uma variedade de vitaminas, além de incluir outra classe de componentes como, os polifenóis, em especial catequinas, metilxantinas, teobromina, cafeína e teofilina (ABIRI *et al.*, 2023).

O Kombucha feito de chá-preto ou chá-verde possui alta concentração de polifenóis e flavonóides (ANANTACHOKE *et al.*, 2023). Em 2020, uma análise realizada identificou a presença de 127 compostos na bebida fermentada (CARDOSO *et al.*, 2020). Entre os compostos

presentes os mais abundantes são galocatequina 3-*O*-galato/Epigallocatequina 3-*O*-galato, isômero 2 de galocatequina/epigallocatequina, catequina, ácido 5-*O*-galoilquínico e derivados de quercetina como quercetina 3-*O*-ramnosil-ramnosil glicosídeo isômero 2 e quercetina 3-*O*-glucosil-ramnosil-galactosídeo, que confere à bebida sua capacidade antioxidante (CARDOSO *et al.*, 2020; D'ALMEIDA *et al.*, 2024).

A composição de compostos bioativos presentes podem diferenciar a depender dos substratos utilizados (BARROS; BOTELHO; CHISTÉ, 2024). O polifenol é composto mais abundante do chá, sendo responsável por conferir propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, associadas à redução de risco de doenças (RANA *et al.*, 2022). Substratos alternativos podem contribuir com melhores propriedades antimicrobianas, antiproliferativas, que promovem benefícios à saúde (BARROS; BOTELHO; CHISTÉ, 2024). Logo, a variedade de compostos existentes confere potencial ao Kombucha de ser benéfico para saúde, com efeitos: antimalárico (NORONHA *et al.*, 2022), anticancerígeno (TAUPIQUROHMAN *et al.*, 2024), cardiometabólico (ATKINSON *et al.*, 2023; MENDELSON *et al.*, 2023), modulação da microbiota intestinal (COSTA *et al.*, 2022), entre outros já relatados.

Estudos correlacionam a capacidade antioxidante do Kombucha à concentração de composto fenólicos, ácido glucônico, compostos derivados de tearubiginas, entre outros encontrados na bebida, que atuam reduzindo a formação de radicais livres (MORALES, 2020). Os radicais livres se acumulam no organismo devido ao estresse oxidativo, e os compostos com capacidade antioxidante atuam reduzindo esses radicais, doando ou retirando elétrons, que podem incluir as espécies reativas de oxigênio (EROs) e espécies reativas de nitrogênio (ERNs) (VÁZQUEZ-CABRAL *et al.*, 2017). Além da inibição de radicais livres, o Kombucha pode atenuar os danos causados pelo estresse oxidativo através da recuperação da atividade de enzimas consideradas antioxidantes como a superóxido dismutase e a catalase (BHATTACHARYA; GACHHUI; SIL, 2013).

Em estudo realizado com humanos, o consumo regular de Kombucha de chá-preto proporcionou impacto positivo na saúde metabólica de indivíduos com obesidade quando houve associação a um padrão alimentar de baixo potencial inflamatório e ricos em alimentos antioxidantes (FRAIZ *et al.*, 2024b). Para assegurar as alegações dos benefícios à saúde é pertinente responder questões como dose segura, frequência e duração do consumo, e para quais indivíduos é benéfico e prejudicial (KAPP; SUMNER, 2019). Portanto, mais estudos em seres humanos devem ser realizados para a confirmação de sua eficácia e garantia de sua segurança.

Em relação ao potencial efeito na modulação da microbiota por alimentos fermentados se dá devido à presença de microrganismos com potencial probiótico na bebida (DIMIDI *et al.*, 2019). Um estudo encontrou 189 espécies de bactérias na bebida, sendo as mais abundantes pertencentes ao gênero *Acetobacter*, subsequentemente aos gêneros *Bacillus* e *Komagataeibacter* e outras espécies em menor quantidade, bem como leveduras dos gêneros *Starmerella*, *Galiella* e *Hanseniaspora*. No intestino, esses microrganismos formam simbiose com estirpes que alegam ser benéficas para a microbiota intestinal (KAASHYAP; COHEN; MANTRI, 2021). Apesar do Kombucha conter microrganismos vivos, a afirmativa de que ele apresenta estirpes probióticas é incerta. Estudos precisam ser realizados para confirmar a presença desses microrganismos e se estão presentes em quantidades adequadas e necessárias para conferir os benefícios à saúde (VARGAS; FABRICIO; ZÁCHIA AYUB, 2021).

Em estudos com animais, o tratamento com Kombucha potencializou a presença de bactérias benéficas e reduziu as patogênicas na microbiota intestinal (COSTA *et al.*, 2023). Um estudo realizado em humanos demonstrou que o tratamento com Kombucha não alterou os parâmetros bioquímicos analisados, mas influenciou positivamente na quantidade e variedade de bactérias presente no microbioma intestinal, no entanto, o número de participantes foi pequeno, trazendo possível viés ao resultado encontrado (ECKLU-MENSAH *et al.*, 2024).

Sobre o efeito antibacteriano, o Kombucha convencional mostrou atividade antibacteriana contra *Escherichia coli*, uma bactéria patogênica comumente encontrada em alimentos. Além disso, obteve bons resultados contra patógenos como *Helicobacter pylori* e *Staphylococcus aureus*, presentes no trato gastrointestinal humano (NYIEW; KWONG; YOW, 2022). Al-Mohammadi *et al.* (2021) também confirmaram o potencial antimicrobiano do Kombucha em *S. aureus* e *E. coli*.

Por outro lado, alguns registros na literatura indicam riscos potenciais do consumo de Kombucha para a saúde, como acidose láctica, hepatite tóxica, insuficiência renal aguda, reação alérgica, náuseas, vômitos, dor de cabeça (KAPP; SUMNER, 2019; MIRANDA *et al.*, 2022). Considerando estes aspectos, alguns cuidados de consumo devem ser seguidos em diferentes grupos, como gestantes e crianças, que não devem consumir a bebida devido a presença de teor alcoólico. Além disso, também é desaconselhado o consumo de Kombucha por indivíduos que já apresentam alguma condição clínica prévia, como imunossuprimidos, por exemplo (ANANTACHOKE *et al.*, 2023). O potencial citotóxico relacionado ao consumo de Kombucha pode ser devido principalmente à formação dos subprodutos da fermentação, como os ácidos orgânicos ácido glucurônico, ácido acético e ácido D-sacárico 1,4-lactona (DSL) (FRAIZ *et al.*, 2024b).

Estudo recente avaliou o efeito benéfico da ingestão de Kombucha em humanos e não registraram nenhum efeito adverso envolvendo os participantes relacionado a intolerância ou toxicidade provocada pela bebida (COSTA *et al.*, 2023; FRAIZ *et al.*, 2024a), sendo relatado ainda melhora em alguns sintomas gastrointestinais como azia, eructações e refluxo (FRAIZ *et al.*, 2024b). Cardoso *et al.* (2020) avaliaram a toxicidade em modelo *in vitro* e constatou que o extrato do chá possui efeito citotóxico em células cancerígenas, mas, em células de linhagem não cancerígena, não demonstrou tal efeito, indicando baixa toxicidade. Apesar dos benefícios descritos na

literatura, há escassez de estudos que investiguem a dosagem segura do consumo de Kombucha em humanos (COSTA *et al.*, 2023).

Aspectos regulatórios e de segurança

Quanto à regulamentação de produção do Kombucha, o Brasil é o primeiro país a possuir um padrão de identidade e qualidade que instrui quanto ao processo de elaboração da bebida. Os parâmetros de análise incluem pH (2,5-4,2), graduação alcoólica (% v/v), sendo considerada sem álcool a Kombucha com até 0,5% e alcoólica, com graduação de 0,6% a 8,0%, acidez volátil (30-130 mEq/L) e pressão na Kombucha com adição de CO₂ (1,1-3,9 atm a 20 °C) (MAPA, 2019).

Em outros países, como os Estados Unidos da América (EUA), Austrália e Nova Zelândia, não possuem um documento oficial sobre a regulamentação da produção de Kombucha. Embora, possuam documentos com orientações disponibilizadas por empresas, associações, como a *Kombucha Brewers International* (KBI), *Centre of Disease Control of British Columbia* (BCCDC), e a *Food and Drug Administration* (FDA), para regulamentações de bebidas acidificadas, nenhuma delas é específica para o Kombucha (MUKHERJEE *et al.*, 2022).

Inovações e tendências relacionadas a bebida Kombucha

A estimativa é que até 2029 o lucro da indústria de Kombucha atinja até 5,9 bilhões de dólares. Além disso, somente nos Estados Unidos da América (EUA) existem mais de 100 empresas registradas como membro da KBI (KIM; ADHIKARI, 2020; KITWETCHAROEN *et al.*, 2025). A popularidade da bebida vem aumentando de acordo com a conscientização de suas propriedades para saúde, e principalmente para indivíduos intolerantes e/ou vegetarianos estritos. Com

isso, aumenta-se o espaço para inovações a partir do Kombucha, contudo devem se atentar a qualidade sensorial, estabilidade e preço fornecido (COSME; INÊS; VILELA, 2022).

Nos últimos anos, novos substratos estão sendo alvo de estudos, a matéria-prima utilizada pode variar entre frutas, hortaliças, folhas, flores, café, ervas, especiarias, leite, algas e açúcares (FREITAS; SOUSA; WURLITZER, 2022). Estudos utilizando substratos alternativos como casca e caroço de abacaxi (PHUNG *et al.*, 2023), folhas de bambu e folhas de amoreira (XIONG *et al.*, 2023), folhas de café (HUANG *et al.*, 2024), plantas alimentícias não convencionais (PANC) de nome científico *Malvaviscus arboreus* (Silva *et al.*, 2021b), mamão (SHARIFUDIN *et al.*, 2021), já foram desenvolvidos. A utilização de novos substratos, além de promover novos sabores, contribui para melhoria das características físico-químicas, como o aumento da concentração de compostos bioativos e a aparição de novos compostos, além disso, atribui novas características sensoriais (BORTOLOMEDI; PAGLARINI; BROD, 2022; LIU *et al.*, 2022). A busca por alternativas mais naturais, energizantes e benéficas para a saúde impulsiona o mercado de bebidas fermentadas a fornecer maior variedade dessas bebidas, melhorando seu valor e atendendo as necessidades básicas do consumidor de promoção de saúde e diversificação de sabores (GUPTA *et al.*, 2023).

Para garantir que as características alcançadas sejam preservadas ou até mesmo intensificadas, alguns métodos de processamento estão sendo utilizados nos alimentos, como é o caso das tecnologias emergentes (HARIKRISHNA *et al.*, 2023). Este tipo de tratamento pode ser utilizado para substituir o processamento térmico, alguns métodos aplicados são o plasma frio, luz ultravioleta, campo elétrico pulsado, ultrassom, irradiação, processamento de alta pressão e luz pulsada (ROCHA *et al.*, 2022). Um exemplo da aplicação destas tecnologias emergentes em Kombucha é o estudo de (VAZQUEZ-CABRAL *et al.*, 2016). Neste estudo demonstrou-se que a utilização do campo elétrico pulsado no Kombucha, não alterou as propriedades de pH,

condutividade e sólidos solúveis. Entretanto, os fluxos de alimentação mais baixos foram benéficos, não causando redução da contagem de leveduras e proporcionando aumento do conteúdo de fenólicos totais e flavonóides (VAZQUEZ-CABRAL *et al.*, 2016). Em outro estudo, a aplicação do ultrassom foi avaliada e foi observado que o tratamento acelera a degradação de polifenóis ao longo da fermentação, com taxa de consumo ainda maior quando aplicado uma frequência de 23 kHz. Logo, a utilização dessa técnica em frequência e tempo aumentado pode destruir compostos importantes na caracterização de sabor da bebida (KANG *et al.*, 2022), sendo necessária melhor avaliação das condições de aplicação. Wang *et al.* (2023), por sua vez, demonstraram que o emprego do ultrassom a 23 kHz mostrou otimizar a fermentação no terceiro dia, a 30 °C e pH de 3,2. Outra tecnologia que pode ser utilizada a fim de acompanhar a qualidade do Kombucha é a espectroscopia de infravermelho próximo, que monitora as alterações de açúcar total durante o processo de fermentação, uma vez que o açúcar é um substrato importante para formação de novos compostos da bebida (ZHAO *et al.*, 2023).

Outra tendência observada é a potencialidade de uso da Kombucha em diversas áreas, como a utilização da *SCOBY* na indústria têxtil, biotecnologia e produção de biomateriais. Além disso, esse material pode possibilitar diferentes usos na indústria de alimentos, como, por exemplo, na criação de filmes comestíveis, embalagem de alimentos e encapsulamento de ingredientes ativos (AUNG; KIM, 2024). A celulose bacteriana também é uma alternativa sustentável promissora para o desenvolvimento de embalagens de alimentos. Ao contrário da embalagem de plástico, ela não permanece no meio ambiente por muito tempo e não libera substâncias tóxicas. Além disso, possui notável propriedade antibacteriana, mostrando resultado benéfico para a segurança e durabilidade dos alimentos (WANG *et al.*, 2025). Também vale destacar que a *SCOBY* é considerado uma matéria-prima sustentável, por ser biocompatível, biodegradável e

segura, podendo ser utilizada como aditivo alimentar e na produção de cosméticos (MUIRURI *et al.*, 2023).

Existe a especulação da utilização da *SCOBY* na indústria têxtil, porém mais estudos precisam ser realizados para verificar o potencial de rendimento de produção da celulose, e confirmar a performance no resultado do material (WOOD *et al.*, 2022). Devido às propriedades singulares da celulose, a indústria ainda tem muito o que explorar sobre este material. Mas, sabe-se que existe um grande potencial de crescimento para uma linha de produção mais sustentável, sendo um futuro de pesquisas promissoras para as indústrias (LAAVANYA; SHIRKOLE; BALASUBRAMANIAN, 2021; MUIRURI *et al.*, 2023).

Para a culinária, a *SCOBY* é versátil, pois pode ser preparado cru, marinado, curado, cozido, e apresentado com ingrediente em diferentes pratos (TORÁN-PEREG *et al.*, 2021). Também já foi testado como fermentador de pão. Apesar de ter melhorado algumas propriedades como o conteúdo de compostos fenólicos totais, teor de minerais e capacidade antioxidante, esta formulação resultou em um pão mais duro e de coloração mais escura, o que pode impactar na sua aceitabilidade (KAYA; ASIR, 2022).

Considerações finais

As diferentes perspectivas abordadas ao longo deste capítulo reforçam o papel crescente do Kombucha como uma bebida de destaque no mercado global. Cabe ainda destacar que esse crescente interesse na bebida Kombucha também tem estimulado a busca pelo produto no mercado, bem como tem motivado a elaboração em âmbito doméstico. A composição do Kombucha pode variar em função de diferentes parâmetros durante a elaboração da bebida, como as condições de fermentação, fonte de carbono, presença ou não de substrato alternativo na formulação e diversidade microbiana presente no processo de fermentação. A segurança microbiológica do Kombucha é atribuída

ao baixo valor de pH após o processo fermentativo. Entretanto, sugere-se que produtores e consumidores acompanhem de perto todo o processo de produção para minimizar os riscos de contaminação biológica. Em relação aos aspectos sensoriais, a bebida pode ser aprimorada com uso de diferentes substratos durante o processo fermentativo, pois estes são fatores decisivos para a aceitação do consumidor, contribuindo para a expansão do consumo dessa bebida fermentada. Por fim, os benefícios funcionais associados ao Kombucha, como suas propriedades antioxidantes, destacam seu potencial como um aliado para a saúde humana. Entretanto, ainda são necessários mais ensaios clínicos para melhor elucidar os aspectos funcionais da bebida.

Referências

- ABIRI, B. *et al.* Tea's anti-obesity properties, cardiometabolic health-promoting potentials, bioactive compounds, and adverse effects: a review focusing on white and green teas. **Food Science & Nutrition**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 5818–5836, 2023.
- AL-MOHAMMADI, A.-R. *et al.* Chemical constitution and antimicrobial activity of Kombucha fermented beverage. **Molecules**, [s. l.], v. 26, n. 16, p. 5026, 2021.
- ANANTACHOKE, N. *et al.* Kombucha beverages produced from fruits, vegetables, and plants: a review on their pharmacological activities and health benefits. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1818, 2023.
- ANDRESON, M. *et al.* Evaluation of microbial dynamics of Kombucha consortia upon continuous backslipping in coffee and orange juice. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 19, p. 3545, 2023.
- ANTOLAK, H.; PIECHOTA, D.; KUCHARSKA, A. Kombucha tea—a double power of bioactive compounds from tea and symbiotic culture of bacteria and yeasts (SCOBY). **Antioxidants**, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 1541, 2021.

- ATKINSON, F. S. *et al.* Glycemic index and insulin index after a standard carbohydrate meal consumed with live Kombucha: a randomised, placebo-controlled, crossover trial. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 10, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- AUNG, T.; KIM, M. J. A comprehensive review on Kombucha biofilms: a promising candidate for sustainable food product development. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 144, p. 104325, 2024.
- BARBA, F. J. *et al.* Potential use of pulsed electric technologies and ultrasounds to improve the recovery of high-added value compounds from blackberries. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 167, p. 38–44, 2015.
- BARROS, V. C.; BOTELHO, V. A.; CHISTÉ, R. C. Alternative substrates for the development of fermented beverages analogous to Kombucha: an integrative review. **Foods**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 1768, 2024.
- BHATTACHARYA, S.; GACHHUI, R.; SIL, P. C. Effect of Kombucha, a fermented black tea in attenuating oxidative stress mediated tissue damage in alloxan induced diabetic rats. **Food and Chemical Toxicology**, [s. l.], v. 60, p. 328–340, 2013.
- BISHOP, P. *et al.* Chemical composition of Kombucha. **Beverages**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 45, 2022.
- BORTOLOMEDI, B. M.; PAGLARINI, C. S.; BROD, F. C. A. Bioactive compounds in Kombucha: a review of substrate effect and fermentation conditions. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 385, p. 132719, 2022.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 41, de 17 de setembro de 2019. Estabelece o padrão de identidade e qualidade da Kombucha em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 set. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br>. Acesso em: 27 mar. 2025.

- CARDOSO, R. R. *et al.* Kombuchas from green and black teas have different phenolic profile, which impacts their antioxidant capacities, antibacterial and antiproliferative activities. **Food Research International**, [s. l.], v. 128, p. 108782, 2020.
- CAVICCHIA, L. O. A.; ALMEIDA, M. E. F. de. Health benefits of Kombucha: drink and its biocellulose production. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, [s. l.], v. 58, p. e20766, 2023.
- COHEN, G.; SELA, D. A.; NOLDEN, A. A. Sucrose concentration and fermentation temperature impact the sensory characteristics and liking of Kombucha. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 16, p. 3116, 2023.
- COSME, F.; INÊS, A.; VILELA, A. Consumer's acceptability and health consciousness of probiotic and prebiotic of non-dairy products. **Food Research International**, [s. l.], v. 151, p. 110842, 2022.
- COSTA, M. A. de C. *et al.* Kombuchas from green and black tea modulate the gut microbiota and improve the intestinal health of Wistar rats fed a high-fat high-fructose diet. **Nutrients**, [s. l.], v. 14, n. 24, p. 5234, 2022.
- COSTA, M. A. de C. *et al.* Effect of Kombucha intake on the gut microbiota and obesity-related comorbidities: a systematic review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 63, n. 19, p. 3851–3866, 2023.
- D'ALMEIDA, A. P. *et al.* Plant-based probiotic foods: current state and future trends. **Food Science and Biotechnology**, [s. l.], v. 33, n. 15, p. 3401–3422, 2024.
- DARTORA, B. *et al.* Kombuchas from black tea, green tea, and yerba-mate decocts: perceived sensory map, emotions, and physicochemical parameters. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 33, p. 100789, 2023a.
- DARTORA, B. *et al.* Understanding the effect of fermentation time on physicochemical characteristics, sensory attributes, and volatile

- compounds in green tea Kombucha. **Food Research International**, [s. l], v. 174, p. 113569, 2023b.
- DIEZ-OZAETA, I.; ASTIAZARAN, O. J. Recent advances in Kombucha tea: microbial consortium, chemical parameters, health implications and biocellulose production. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l], v. 377, p. 109783, 2022.
- DIMIDI, E. *et al.* Fermented foods: definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease. **Nutrients**, [s. l], v. 11, n. 8, p. 1806, 2019.
- ECKLU-MENSAH, G. *et al.* Modulating the human gut microbiome and health markers through Kombucha consumption: a controlled clinical study. **Scientific Reports**, [s. l], v. 14, p. 31647, 2024.
- FABRICIO, M. F. *et al.* Effect of freeze-dried Kombucha culture on microbial composition and assessment of metabolic dynamics during fermentation. **Food Microbiology**, [s. l], v. 101, p. 103889, 2022.
- FILIPPIS, F. D. *et al.* Different temperatures select distinctive acetic acid bacteria species and promotes organic acids production during Kombucha tea fermentation. **Food Microbiology**, [s. l], v. 73, p. 11–16, 2018.
- FRAIZ, G. M. *et al.* Green tea Kombucha impacts inflammation and salivary microbiota in individuals with excess body weight: a randomized controlled trial. **Nutrients**, [s. l], v. 16, n. 18, p. 3186, 2024a.
- FRAIZ, G. M. *et al.* The impact of green tea Kombucha on the intestinal health, gut microbiota, and serum metabolome of individuals with excess body weight in a weight loss intervention: a randomized controlled trial. **Foods**, [s. l], v. 13, n. 22, p. 3635, 2024b.
- FREITAS, A.; SOUSA, P.; WURLITZER, N. Alternative raw materials in Kombucha production. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l], v. 30, p. 100594, 2022.

- GRASSI, A. *et al.* Storage time and temperature affect microbial dynamics of yeasts and acetic acid bacteria in a Kombucha beverage. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l], v. 382, p. 109934, 2022.
- GUPTA, A. *et al.* Trends in functional beverages: functional ingredients, processing technologies, stability, health benefits, and consumer perspective. **Food Research International**, [s. l], v. 170, p. 113046, 2023.
- HARIKRISHNA, S. *et al.* Cold plasma as an emerging nonthermal technology for food processing: a comprehensive review. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l], v. 14, p. 100747, 2023.
- HUANG, G. *et al.* Characterization of Kombucha prepared from black tea and coffee leaves: a comparative analysis of physiochemical properties, bioactive components, and bioactivities. **Journal of Food Science**, [s. l], v. 89, n. 6, p. 3430–3444, 2024.
- JAKUBCZYK, K. *et al.* Effects of fermentation time and type of tea on the content of micronutrients in Kombucha fermented tea. **Nutrients**, [s. l], v. 14, n. 22, p. 4828, 2022.
- JAYABALAN, R. *et al.* Preservation of Kombucha tea—effect of temperature on tea components and free radical scavenging properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l], v. 56, n. 19, p. 9064–9071, 2008.
- JAYABALAN, R. *et al.* A review on Kombucha tea—microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l], v. 13, n. 4, p. 538–550, 2014.
- JÚNIOR, J. C. da S. *et al.* Kombucha: formulation, chemical composition, and therapeutic potentialities. **Current Research in Food Science**, [s. l], v. 5, p. 360–365, 2022.
- KAASHYAP, M.; COHEN, M.; MANTRI, N. Microbial diversity and characteristics of Kombucha as revealed by metagenomic and

- physicochemical analysis. **Nutrients**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 4446, 2021.
- KANG, W. *et al.* Emerging applications of nano-optical sensors combined with near-infrared spectroscopy for detecting tea extract fermentation aroma under ultrasound-assisted sonication. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 88, p. 106095, 2022.
- KAPP, J. M.; SUMNER, W. Kombucha: a systematic review of the empirical evidence of human health benefit. **Annals of Epidemiology**, [s. l.], v. 30, p. 66–70, 2019.
- KAYA, Z.; ASIR, Y. Assessment of instrumental and sensory quality characteristics of the bread products enriched with Kombucha tea. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 29, p. 100562, 2022.
- KIM, J.; ADHIKARI, K. Current trends in Kombucha: marketing perspectives and the need for improved sensory research. **Beverages**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 15, 2020.
- KITWETCHAROEN, H. *et al.* Enhancing Kombucha functionality: utilizing dried pineapple peels and cores as an alternative ingredient for improved antioxidant and antimicrobial properties. **LWT**, [s. l.], v. 216, p. 117358, jan. 2025.
- KLUZ, M. I. *et al.* Microbiological and physicochemical composition of various types of homemade Kombucha beverages using alternative kinds of sugars. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1523, 2022.
- KOWALSKA, J. *et al.* Influence of tea brewing parameters on the antioxidant potential of infusions and extracts depending on the degree of processing of the leaves of *Camellia sinensis*. **Molecules**, [s. l.], v. 26, n. 16, p. 4773, 2021.
- LAAVANYA, D.; SHIRKOLE, S.; BALASUBRAMANIAN, P. Current challenges, applications and future perspectives of Scoby cellulose of Kombucha fermentation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 295, p. 126454, 2021.

- LEI, G. *et al.* Probiotic products from laboratory to commercialization. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 155, p. 104807, jan. 2025.
- LEONARSKI, E. *et al.* Production process and characteristics of Kombucha fermented from alternative raw materials. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 49, p. 101841, 1 out. 2022.
- LIU, Y. *et al.* Effects of brewing conditions on the phytochemical composition, sensory qualities and antioxidant activity of green tea infusion: a study using response surface methodology. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 269, p. 24–34, 2018.
- LIU, Y. *et al.* Functional properties and sensory characteristics of Kombucha analogs prepared with alternative materials. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 129, p. 608–616, 2022.
- LIU, Y. *et al.* Advancement and challenges in tea brewing: the dynamic principles, influencing factors, innovative processing technologies and pollutants. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 153, p. 104735, 2024.
- MELO, R. *et al.* Historical overview and current perspectives on Kombucha and *SCOBY*: a literature review and bibliometrics. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 59, p. 102144, 2024.
- MENDELSON, C. *et al.* Kombucha tea as an anti-hyperglycemic agent in humans with diabetes – a randomized controlled pilot investigation. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 10, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- MENG, Y. *et al.* Microbial interactions and dynamic changes of volatile flavor compounds during the fermentation of traditional Kombucha. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 430, p. 137060, 2024.
- MIRANDA, J. F. de *et al.* Kombucha: a review of substrates, regulations, composition, and biological properties. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 87, n. 2, p. 503–527, 2022.
- MIRANDA, J. F. de *et al.* Arabic coffee infusion based Kombucha: characterization and biological activity during fermentation, and in vivo toxicity. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 412, p. 135556, 2023.

- MORALES, D. Biological activities of Kombucha beverages: the need of clinical evidence. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 105, p. 323–333, 2020.
- MUIRURI, J. K. *et al.* Bacterial cellulose: recent advances in biosynthesis, functionalization strategies and emerging applications. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 199, p. 112446, 2023.
- MUKHERJEE, A. *et al.* Global regulatory frameworks for fermented foods: a review. **Frontiers in Nutrition**, [s. l.], v. 9, p. 902642, 2022.
- NORONHA, M. C. de *et al.* Black tea Kombucha: physicochemical, microbiological and comprehensive phenolic profile changes during fermentation, and antimalarial activity. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 384, p. 132515, 2022.
- NYHAN, L. M. *et al.* Advances in Kombucha tea fermentation: a review. **Applied Microbiology**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 73–103, 2022.
- NYIEW, K.; KWONG, P. J.; YOW, Y. An overview of antimicrobial properties of Kombucha. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 1024–1053, 2022.
- OLIVEIRA, Í. A. C. L. de *et al.* The technological perspectives of Kombucha and its implications for production. **Fermentation**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 185, 13 abr. 2022.
- PHUNG, L. T. *et al.* Changes in the chemical compositions and biological properties of Kombucha beverages made from black teas and pineapple peels and cores. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, p. 7859, 2023.
- RANA, A. *et al.* Health benefits of polyphenols: a concise review. **Journal of Food Biochemistry**, [s. l.], v. 46, n. 10, p. e14264, 2022.
- ROCHA, C. dos S. *et al.* Emerging technologies in food processing: impacts on sensory characteristics and consumer perception. **Current Opinion in Food Science**, [s. l.], v. 47, p. 100892, 2022.
- SADOK, I. *et al.* Effect of temperature and time on mold growth, mycotoxin contamination, phytochemicals and microbiological

- characteristics of Kombucha tea during fermentation. **Food Control**, [s. l.], v. 175, p. 111296, set. 2025.
- SALES, A. L. *et al.* Intracellular antioxidant and anti-inflammatory effects and bioactive profiles of coffee cascara and black tea Kombucha beverages. *Foods*, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1905, 2023.
- SANTOS, D. F. dos *et al.* Honey-Kombucha beverage with yerba maté infusion: development, polyphenols profile, and sensory acceptance. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 36, p. 100909, 2024.
- SHARIFUDIN, S. A. *et al.* Fermentation and characterisation of potential Kombucha cultures on papaya-based substrates. **LWT**, [s. l.], v. 151, p. 112060, 2021.
- SILVA, K. A. *et al.* Kombucha beverage from non-conventional edible plant infusion and green tea: characterization, toxicity, antioxidant activities and antimicrobial properties. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 34, p. 102032, 2021.
- SOARES, M. G.; DE LIMA, M.; REOLON SCHMIDT, V. C. Technological aspects of Kombucha, its applications and the symbiotic culture (*SCOBY*), and extraction of compounds of interest: a literature review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 110, p. 539–550, 2021.
- TAUPIQUROHMAN, O. *et al.* From fermentation to cancer prevention: the anticancer potential of Kombucha. **Phytomedicine Plus**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 100633, 2024.
- TORÁN-PEREG, P. *et al.* Microbiological and sensory characterization of Kombucha *SCOBY* for culinary applications. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [s. l.], v. 23, p. 100314, 2021.
- TRAN, T. *et al.* Microbiological and technological parameters impacting the chemical composition and sensory quality of Kombucha. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 1712–1770, 2020.

- VARGAS, B. K.; FABRICIO, M. F.; AYUB, M. A. Z. Health effects and probiotic and prebiotic potential of Kombucha: a bibliometric and systematic review. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 44, p. 101332, 2021.
- VAZQUEZ-CABRAL, D. *et al.* Efeito de análogos de Kombucha tratados com campo elétrico pulsado (PEF) de infusões de *Quercus obtusata* em bioativos e microrganismos. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 34, p. 171–179, 2016.
- VÁZQUEZ-CABRAL, B. D. *et al.* Oak Kombucha protects against oxidative stress and inflammatory processes. **Chemico-Biological Interactions**, [s. l.], v. 272, p. 1–9, 2017.
- VILLARREAL-SOTO, S. A. *et al.* Understanding Kombucha tea fermentation: a review. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 83, n. 3, p. 580–588, 2018.
- WANG, B. *et al.* Kombucha: production and microbiological research. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 21, p. 3456, 2022.
- WANG, Z. *et al.* Identification of volatile compounds and metabolic pathway during ultrasound-assisted Kombucha fermentation by HS-SPME-GC/MS combined with metabolomic analysis. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 94, p. 106339, 2023.
- WANG, Z. *et al.* Applications of bacterial cellulose in the food industry and its health-promoting potential. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 464, p. 141763, 2025.
- WOOD, J. *et al.* Reproducibility of bacterial cellulose nanofibers over sub-cultured generations for the development of novel textiles. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [s. l.], v. 10, p. 876822, 2022.
- WU, X. *et al.* Dynamic changes in microbial communities, physicochemical properties, and flavor of Kombucha made from Fu-brick tea. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 23, p. 4242, 2023.
- XIONG, R.-G. *et al.* Antioxidant activities, phenolic compounds, and sensory acceptability of Kombucha-fermented beverages from

- bamboo leaf and mulberry leaf. **Antioxidants**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1573, 2023.
- YAO, L. *et al.* Revealing the influence of microbiota on the flavor of Kombucha during natural fermentation process by metagenomic and GC-MS analysis. **Food Research International**, [s. l.], v. 169, p. 112909, 2023.
- YE, J.-H. *et al.* Bitterness and astringency of tea leaves and products: formation mechanism and reducing strategies. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 123, p. 130–143, maio 2022.
- YILDIZ, E.; GULDAS, M.; GURBUZ, O. Determination of in-vitro phenolics, antioxidant capacity and bio-accessibility of Kombucha tea produced from black carrot varieties grown in Turkey. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 41, p. 180–187, 2020.
- ZHANG, J. *et al.* The chemistry and sensory characteristics of new herbal tea-based Kombuchas. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 86, n. 3, p. 740–748, 2021.
- ZHAO, S. *et al.* On-line monitoring of total sugar during Kombucha fermentation process by near-infrared spectroscopy: comparison of linear and non-linear multiple calibration methods. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 423, p. 136208, 2023.
- ZOFIA, N.-L. *et al.* Effect of fermentation time on antioxidant and anti-ageing properties of green coffee Kombucha ferments. **Molecules**, [s. l.], v. 25, n. 22, p. 5394, 2020.
- ZOU, C. *et al.* Zijuan tea-based Kombucha: physicochemical, sensorial, and antioxidant profile. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 363, p. 130322, 2021.

Sobre os autores e as autoras

Organizadoras

Jackline Freitas Brilhante de São José

Professora associada do Departamento de Nutrição, Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal do Espírito Santo. Professora permanente do Programa de Pós-graduação em Nutrição e Saúde da Ufes. Nutricionista, mestre em Microbiologia Agrícola e doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Viçosa. Contato: jackline.jose@ufes.br.

Érica Aguiar Moraes

Professora adjunta do Departamento de Nutrição, Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal do Espírito Santo. Nutricionista, mestre em Ciência da Nutrição pela Universidade Federal de Viçosa e doutora em Alimentos e Nutrição com ênfase em nutrição experimental e aplicada à tecnologia de alimentos pela Universidade Estadual de Campinas. Contato: erica.a.moraes@ufes.br.

Colaboradores e colaboradoras

Alessandra Peres Guimarães

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: alessandra.p.guimaraes@edu.ufes.br.

Aline Lopes

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: aline.lopes.17@edu.ufes.br.

Alyne Gomes da Vitória Macedo

Mestre no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: alynegnutri@gmail.com

Ana Paula Rosa do Amaral

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: ana.p.amaral@edu.ufes.br.

Bárbara Morandi Lepaus

Doutoranda pela Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. Mestre em Nutrição e Saúde pelo Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Graduada em Nutrição pela Ufes.

E-mail: bmorandi23@gmail.com.

Beatriz Almeida Balmant

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: biabalmant31@gmail.com.

Daniel Sgrancio Uliana

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo. Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: daniel.uliana@edu.ufes.br.

Gabriela Luiz Meigre Dias Pereira

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: gabriela.l.pereira@edu.ufes.br.

Gabrielly Cristine Lamão Pontes

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: gabrielly.pontes@edu.ufes.br

Guilherme Augusto Loiola Passos

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: Guilherme_alp@hotmail.com.

Kananda Galvão Batestin Messias

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: kananda.messias@edu.ufes.br.

Karolini Zuqui Nunes

Professora adjunta do Departamento de Enfermagem Ufes, professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde (PPGNS/Ufes), professora colaboradora do Programa de Pós-graduação em Ciências Fisiológicas (PPGCF/Ufes). Graduada

em Enfermagem pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), mestrado e doutorado em Ciências Fisiológicas pela Ufes.
E-mail: karolini.nunes@ufes.br.

Laura Aparecida Perim da Cruz

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.
E-mail: laura.cruz@edu.ufes.br.

Lívia Araújo Silva

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.
E-mail: livia.silva.79@edu.ufes.br.

Luiza Sant'Anna Ruy

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.
E-mail: luiza.ruy@edu.ufes.br.

Maira Amaro Pereira

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.
E-mail: maira.a.pereira@edu.ufes.br.

Manueli Monciozo Domingos

Mestre em Nutrição e Saúde pelo Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes).
Graduada em Nutrição pela Ufes.
E-mail: manumondomi@gmail.com.

Maria Clara de Moraes Motta Machado

Mestre no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.
E-mail: mariaclaramotta@hotmail.com.

Maria Julia Bernardone Lima

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: maria.b.lima@edu.ufes.br.

Paola Zava Lorencini

Graduanda em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: paola.lorencini@edu.ufes.br.

Priscila Donatti Leão Alvarenga

Mestre no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Nutricionista pela Universidade de Vila Velha.

E-mail: pridonati@gmail.com.

Rhaiza Marcia Passos Leal

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Saúde na Universidade Federal do Espírito Santo. Nutricionista pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: rhaiza.leal@edu.ufes.br.

Thauan Oliveira Costa

Graduando em Nutrição pela Universidade Federal do Espírito Santo.

E-mail: thauan.costa@edu.ufes.br.

Índice remissivo

A

- aceitação 23, 24, 25, 27, 42, 87, 88, 90,
118, 120, 121, 122, 135, 149, 152, 153,
155, 209, 214, 215, 216, 217, 219, 220,
222, 229, 244, 257, 263, 285, 286,
289, 290, 309, 310, 321, 327, 328,
331, 332, 333, 334, 354, 355, 364,
367, 384, 385, 388, 389, 391, 392, 401
- ácidos graxos 17, 24, 34, 35, 36, 148,
153, 194, 308, 357, 358
- açúcares adicionado 15
- aeróbica 380, 387, 388
- agroindústria 205, 224
- água 19, 21, 25, 27, 31, 38, 41, 42, 45,
66, 67, 68, 69, 71, 74, 77, 83, 88, 104,
107, 112, 115, 117, 119, 120, 140, 145,
147, 150, 151, 153, 161, 164, 184, 189,
191, 193, 194, 195, 197, 245, 246, 250,
277, 278, 280, 284, 287, 302, 305,
313, 323, 328, 352, 392
- algas marinhas 21
- alimentos funcionais 44, 45, 46, 274,
283, 360, 361
- amido 18, 250, 252, 257, 281, 306, 307,
318, 319, 320, 323, 326, 327, 328, 331
- anaeróbica 380, 388
- antioxidante 20, 22, 27, 44, 46, 88, 89,
124, 148, 149, 247, 248, 252, 253,
257, 258, 279, 285, 306, 309, 310,
313, 314, 315, 322, 324, 326, 330, 331,
333, 359, 360, 392, 394, 400
- antocianinas 124, 221, 308, 309, 312,
313, 314, 316, 392
- armazenamento 42, 43, 44, 66, 77, 84,
88, 89, 112, 121, 135, 149, 164, 171,
174, 194, 196, 279, 280, 281, 282,
286, 287, 289, 290, 365
- aroma 18, 32, 38, 40, 46, 75, 76, 113,
122, 148, 178, 282, 285, 286, 310,
363, 384, 386, 388, 391, 392
- atributos sensoriais 21, 34, 37, 38, 82,
89, 154, 310, 311, 328, 329

B

- bactérias 27, 40, 41, 70, 72, 83, 84, 87,

114, 135, 146, 147, 169, 171, 186, 188,
193, 196, 198, 273, 275, 283, 284,
285, 287, 291, 360, 380, 381, 383,
385, 386, 387, 392, 395

bebida 30, 192, 257, 285, 288, 320, 332,
380, 381, 382, 384, 385, 386, 387,
388, 389, 390, 391, 392, 393, 394,
395, 396, 397, 399, 400

bebidas 20, 32, 46, 48, 70, 113, 191, 257,
264, 278, 284, 286, 288, 289, 292,
311, 320, 323, 327, 330, 331, 332, 335,
336, 381, 382, 391, 392, 397, 398

bioativos 20, 24, 39, 44, 45, 46, 48, 79,
108, 109, 113, 118, 123, 124, 161, 177,
183, 198, 243, 244, 247, 249, 254,
258, 259, 264, 281, 283, 285, 288,
289, 313, 325, 326, 335, 359, 360,
390, 391, 394, 398

biodiversidade 14, 16, 115, 261, 352

C

campo elétrico pulsado 28, 38, 46, 162,
165, 167, 398

carboidratos 20, 22, 32, 42, 101, 145,
153, 246, 255, 279, 306, 310, 311, 312,
319, 320, 390

carnes 15, 16, 19, 23, 24, 29, 33, 135,
138, 141, 143, 189, 196, 253, 254, 255

carnes cultivadas 19, 23, 24

cascas 47, 75, 204, 205, 206, 210, 211,
212, 213, 214, 217, 218, 219, 224, 225,
228, 249, 260

cereais 17, 79, 143, 245, 278, 292, 302,
306, 307, 309, 312, 314, 327, 330,
362, 363, 364

cinzas 20, 22, 213, 216, 217, 221, 333

clean label 44

clorofilas 212

coencapsulação 290

colesterol 33, 45, 246, 307

conservação 12, 15, 26, 37, 38, 41, 42,
74, 75, 82, 83, 86, 88, 89, 90, 101,
102, 108, 110, 111, 112, 134, 135, 136,
137, 138, 139, 141, 142, 143, 147, 148,
149, 150, 152, 155, 160, 162, 167, 177,
184, 187, 198, 243, 244

conservantes 37, 44, 70, 161, 248

consumidores 15, 17, 23, 24, 30, 31,
33, 37, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 69, 79,
122, 135, 151, 152, 153, 155, 161, 176,
178, 183, 257, 262, 263, 273, 285,
290, 306, 310, 321, 323, 324, 327,
328, 330, 334, 335, 354, 364, 367,
391, 400

contaminação 66, 78, 87, 112, 189, 193,
194, 196, 204, 352, 365, 384, 386,
400

cor 17, 18, 20, 29, 31, 32, 37, 38, 40, 88,
89, 118, 120, 121, 122, 148, 149, 160,
172, 173, 178, 183, 189, 197, 198, 248,
285, 286, 309, 313, 329, 333, 361,
364, 385, 389, 391, 392, 393

crise ambiental 14

D

desinfecção 39, 68, 69, 111, 113, 142,
144, 173, 192, 193
desperdício 15, 43, 48, 151, 155, 161,
191, 199, 204, 212, 220, 221, 226,
228, 260
DNA 40, 42, 69, 74, 82, 83, 114, 145,
146, 170, 187, 188, 194, 195, 196, 314

E

embalagens 15, 42, 43, 140, 141, 249,
323, 399
entomofagia 352, 353, 354, 355, 356

F

fatores antinutricionais 17, 258, 259,
280, 292, 329
fermentação 17, 33, 39, 71, 160, 259,
279, 280, 282, 283, 284, 285, 286,
289, 290, 292, 325, 326, 332, 359,
380, 382, 384, 386, 387, 388, 389,
390, 391, 392, 393, 396, 399, 400
fibras 17, 20, 21, 31, 32, 45, 48, 244,
246, 249, 252, 254, 255, 257, 264,
274, 278, 302, 307, 319, 320, 329,
352
fibras alimentares 17, 20, 45, 302, 307
filamentosos 40, 73, 83, 84, 114, 135,
173, 188
físico-químicas 115, 138, 149, 198, 257,
287, 384, 386, 391, 398

flavonoides 124, 149, 247, 248, 253,
254, 309, 313, 316, 317, 384, 385
free-from, 46
frutas 15, 30, 31, 32, 42, 44, 45, 46, 47,
66, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 76, 79,
83, 84, 86, 87, 89, 90, 91, 101, 102,
113, 115, 117, 118, 121, 122, 135, 138,
141, 142, 143, 145, 152, 163, 189, 193,
196, 247, 274, 278, 282, 283, 284,
286, 292, 306, 312, 365, 390, 398
funcionais 12, 24, 27, 32, 45, 46, 47,
48, 82, 154, 171, 191, 242, 244, 246,
250, 257, 258, 272, 273, 278, 288,
305, 306, 323, 335, 336, 352, 360,
361, 363, 380, 382, 401
fungos 17, 19, 21, 40, 73, 83, 84, 113,
114, 135, 143, 146, 147, 169, 173, 188,
197

G

gelatinização 307, 327, 328, 352, 363
glúten 18, 46, 250, 305, 308, 310, 321,
327, 330
gorduras saturadas 15, 17, 33, 36, 274
gordura trans 25, 34, 358
gosto 38, 389

H

hidrogenação 34, 35

I

impressão 3D 15, 18
insetos 19, 25, 67, 79, 114, 135, 141, 142,
143, 155, 305, 351, 352, 353, 354,
355, 356, 357, 358, 359, 360, 361,
362, 363, 364, 365, 366, 367
integral 260, 308, 319, 320, 330, 333

K

kombucha 257, 285, 381, 382, 383,
384, 385, 386, 388, 389, 390, 391,
392, 393, 394, 395, 396, 397, 398,
399, 400
Kombucha 285, 380, 381, 382, 396, 397

L

lactose 46
legislações 275
leveduras 40, 73, 83, 84, 113, 114, 143,
169, 173, 188, 196, 282, 284, 285,
291, 332, 380, 381, 383, 385, 386,
387, 392, 395, 398
lipídios 20, 22, 32, 36, 42, 74, 101, 145,
146, 153, 207, 217, 221, 247, 319, 333,
357, 358, 362, 367, 387

M

Maillard 324
meio ambiente 67, 69, 71, 79, 115, 116,
135, 184, 193, 246, 304, 399

microbiana 26, 27, 29, 32, 38, 40, 46,
68, 72, 73, 74, 76, 79, 82, 84, 86, 87,
108, 111, 112, 113, 114, 122, 145, 147,
163, 167, 169, 170, 171, 176, 189, 191,
194, 195, 359, 400
microbiota 76, 77, 195, 246, 272, 275,
283, 287, 292, 359, 360, 388, 394,
395
microencapsulação 281, 282, 290
micronutriente 279
microondas 17, 111, 134, 208, 325
micro-organismos 120, 192, 194, 272,
273, 274, 275, 276, 277, 278, 279,
280, 282, 284, 285, 287, 288, 290,
291, 292
microrganismos 38, 39, 40, 43, 66, 67,
69, 71, 72, 75, 82, 83, 84, 85, 86, 101,
102, 111, 112, 114, 135, 136, 142, 145,
146, 147, 149, 151, 154, 155, 160, 161,
162, 167, 169, 170, 171, 177, 178, 184,
186, 187, 188, 189, 190, 193, 194, 195,
196, 199, 274, 276, 277, 278, 280,
283, 284, 291, 323, 327, 380, 384,
386, 387, 388, 395
minerais 17, 20, 21, 23, 101, 171, 244,
246, 252, 254, 255, 258, 264, 274,
277, 278, 308, 352, 357, 367, 387,
400
monoinsaturados 357

N

não-térmicos 167, 184

novos ingredientes 12, 15, 365
nutricionais 21, 22, 41, 44, 47, 48, 67,
70, 82, 86, 90, 102, 119, 123, 124, 135,
148, 149, 155, 161, 174, 178, 183, 187,
191, 196, 199, 242, 244, 245, 252,
257, 260, 262, 263, 264, 265, 277,
279, 283, 306, 310, 328, 331, 332,
352, 353, 354, 355, 358, 359, 361,
364, 367, 386, 387

O

óleo 21, 34, 35, 36, 45, 77, 78, 87, 88,
89, 113, 245
oleogéis 34, 36
orgânicos 25, 44, 68, 70, 72, 73, 82, 85,
88, 90, 111, 113, 123, 153, 207, 209,
275, 284, 289, 290, 312, 388, 396
oxidação 74, 88, 118, 148, 149, 150, 161,
174, 183, 194, 314, 324

P

panificados 303, 321, 327, 330, 361
pasteurização 37, 39, 40, 41, 44, 46,
102, 111, 113, 161, 162, 173, 175, 183,
184, 187
peptídeos bioativos 289, 359
pH 23, 27, 43, 44, 70, 71, 72, 88, 89,
148, 149, 161, 175, 176, 177, 198, 276,
277, 278, 280, 284, 287, 289, 291,
383, 386, 387, 392, 397, 398, 400
pigmentos 22, 48, 177, 195, 247, 313

plantas 15, 16, 17, 18, 19, 34, 68, 70,
72, 75, 77, 78, 79, 90, 243, 244, 245,
247, 249, 251, 258, 259, 260, 261,
262, 263, 264, 265, 274, 289, 291,
309, 312, 313, 390, 398
plant-based 16, 244
poliinsaturados 357
Prebióticos 272
probióticos 30, 272, 273, 274, 275,
276, 277, 278, 279, 280, 281, 282,
284, 285, 286, 287, 288, 289, 290,
291, 292
proteínas 12, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22,
23, 24, 25, 39, 72, 83, 86, 101, 110,
118, 120, 145, 153, 170, 175, 194, 195,
244, 245, 247, 249, 250, 254, 257,
264, 288, 307, 310, 311, 318, 320,
324, 325, 327, 332, 333, 352, 355,
357, 359, 361, 364, 367, 387, 393
proteínas animais 16, 17, 19, 24, 244,
245
protozoários 188

R

radiação 38, 40, 41, 42, 68, 79, 85, 89,
134, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142,
143, 144, 146, 147, 148, 149, 151, 152,
153, 154, 183, 184, 185, 186, 187, 188,
189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196,
197, 198, 199
radiação ultravioleta 38, 40, 79, 85,
144, 152, 183, 184, 199

radicais livres 42, 82, 108, 120, 145,
175, 195, 211, 247, 313, 315, 360, 394
regulamentação 45, 353, 354, 365, 366,
397
resíduos químicos 38, 191

S

sabor 17, 21, 24, 26, 27, 28, 30, 32, 33,
35, 37, 38, 40, 46, 72, 76, 87, 113,
118, 120, 122, 148, 172, 173, 178, 183,
250, 255, 282, 284, 285, 286, 290,
310, 311, 322, 323, 327, 332, 335, 362,
363, 364, 381, 382, 385, 386, 388,
389, 391, 392, 393, 399
saudáveis 12, 14, 15, 19, 26, 28, 30, 34,
35, 48, 125, 161, 244, 286, 290, 319,
321, 335, 367, 381, 386, 391
saudável 32, 242, 243, 244, 257, 308,
381, 382, 385
saúde 6, 7, 14, 15, 16, 25, 26, 29, 33, 44,
45, 46, 48, 49, 51, 59, 66, 68, 69, 73,
79, 101, 115, 116, 136, 137, 151, 193,
210, 211, 212, 220, 222, 224, 229,
231, 244, 245, 247, 259, 260, 262,
264, 265, 266, 271, 272, 273, 274,
279, 282, 287, 288, 289, 291, 292,
294, 304, 306, 309, 312, 313, 314,
315, 316, 323, 335, 336, 355, 359,
366, 369, 381, 382, 390, 391, 393,
394, 395, 396, 397, 398, 401, 412,
413, 414, 415, 416
segurança 15, 19, 29, 37, 38, 41, 45, 46,

49, 66, 67, 73, 86, 90, 101, 102, 113,
134, 135, 137, 138, 147, 151, 152, 153,
155, 170, 172, 183, 184, 197, 205, 209,
222, 223, 224, 228, 243, 244, 248,
261, 264, 275, 283, 291, 303, 305,
306, 336, 365, 366, 367, 384, 388,
395, 397, 399, 400

segurança dos alimentos 37, 86, 135,

147, 155, 172, 184

síndrome global 14, 45, 49

sódio 25, 26, 27, 28, 36, 68, 77, 79

sorgo 246, 302, 303, 304, 305, 306,
307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314,
315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322,
323, 324, 325, 326, 327, 328, 329,
330, 331, 332, 333, 334, 335, 336

subprodutos 16, 47, 48, 67, 69, 71, 79,
203, 204, 205, 206, 207, 208, 209,
210, 211, 212, 213, 214, 217, 218, 221,
222, 223, 224, 225, 226, 227, 228,
229, 260, 393, 396

sustentável 14, 15, 19, 24, 25, 44, 47,
75, 90, 102, 151, 191, 199, 242, 244,
261, 262, 264, 282, 303, 304, 306,
355, 358, 363, 365, 367, 399, 400

T

taninos 247, 248, 253, 258, 259, 302,
307, 308, 309, 310, 311, 312, 314, 315,
317, 318, 320, 324, 325, 326, 330,
331, 332, 333, 385

temperatura 34, 38, 43, 70, 71, 82, 89,

107, 108, 110, 114, 119, 123, 147, 150,
162, 163, 164, 167, 169, 171, 176, 178,
193, 276, 284, 287, 290, 327, 328,
329, 332, 382, 383, 384, 385, 386,
387, 389, 392, 393

textura 17, 18, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29,
32, 36, 38, 40, 44, 87, 89, 115, 118,
120, 121, 160, 172, 174, 178, 183, 197,
250, 285, 286, 287, 324, 333, 361,
363, 364, 365

toxicidade 208, 258, 262, 382, 388, 396

toxinas 258

tratamentos térmicos 37, 85, 102, 111,
118, 119, 161, 173, 184, 325, 328

vegetais 12, 16, 17, 19, 21, 45, 72, 73,
75, 76, 79, 80, 83, 84, 85, 90, 118,
120, 121, 138, 141, 189, 190, 245, 247,
260, 274, 280, 287, 289, 290, 291,
312, 323, 365

vírus 40, 41, 45, 73, 83, 147, 188

vitaminas 16, 17, 20, 21, 23, 24, 48, 87,
101, 113, 118, 123, 148, 150, 161, 171,
183, 244, 246, 252, 254, 255, 258,
264, 274, 277, 278, 282, 289, 321,
324, 352, 357, 367, 380, 387, 393

U

ultraprocessados 14, 30, 33, 273

ultrassom 38, 39, 68, 80, 81, 82, 86,
88, 90, 102, 112, 113, 117, 121, 122,
123, 398

UV 40, 68, 85, 86, 89, 134, 144, 146,
149, 152, 184, 185, 186, 187, 188, 189,
190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197,
198, 199

V

valor energético 22, 257, 357

valor nutricional 14, 20, 22, 24, 26, 42,
48, 87, 150, 249, 303, 335, 352, 353,
357, 367, 390

veganos 244

