



Aurum
EDITORA



CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

APLICADA À SAÚDE HUMANA

BRUNA CARLA LEITE VIANA
BRUNA MAYARA ROLDÃO FERREIRA
ELIENAE DA SILVA GOMES
FLÁVIA TEIXEIRA KÉLLER
JOICE CAMILA MARTINS DA COSTA
LUANA MORAIS ANTONINI
SIMONE MARIA ALTOÉ PORTO





Aurum
EDITORA

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

APLICADA À SAÚDE HUMANA

BRUNA CARLA LEITE VIANA
BRUNA MAYARA ROLDÃO FERREIRA
ELIENAE DA SILVA GOMES
FLÁVIA TEIXEIRA KÉLLER
JOICE CAMILA MARTINS DA COSTA
LUANA MORAIS ANTONINI
SIMONE MARIA ALTOÉ PORTO



AURUM EDITORA LTDA – 2026

Curitiba – Paraná - Brasil

EDITOR CHEFE

Lucas Gabriel Vieira Ewers

AUTORAS DO LIVRO

Bruna Carla Leite Viana

Bruna Mayara Roldão Ferreira

Elieana da Silva Gomes

Flávia Teixeira Keller

Joice Camila Martins da Costa

Luana Moraes Antonini

Simone Maria Altoé Porto

Copyright © Aurum Editora Ltda

Texto Copyright © 2026 Os Autores

Edição Copyright © 2026 Aurum Editora Ltda

EDIÇÃO DE TEXTO

Stefanie Vitoria Garcia de Bastos



Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

EDIÇÃO DE ARTE

Aurum Editora Ltda

IMAGENS DA CAPA

Magnific Team, Canva.

BIBLIOTECÁRIA

Bruna Heller

ÁREA DE CONHECIMENTO

Ciência e Tecnologia de Alimentos

A responsabilidade pelo conteúdo, precisão e veracidade dos dados apresentados neste texto é inteiramente do autor, não refletindo necessariamente a posição oficial da Editora. O trabalho pode ser baixado e compartilhado, desde que o crédito seja dado ao autor, mas não é permitida a modificação do conteúdo de qualquer forma ou seu uso para fins comerciais.

A Aurum Editora se compromete a manter a integridade editorial em todas as fases do processo de publicação, prevenindo plágio, dados ou resultados fraudulentos, e assegurando que interesses financeiros não afetem os padrões éticos da publicação. Qualquer suspeita de má conduta científica será verificada com atenção aos princípios éticos e acadêmicos. Todos os manuscritos passaram por uma avaliação duplo-cega, realizada pelos membros do Conselho Editorial, e foram aprovados para publicação com base em critérios de imparcialidade e objetividade acadêmica.

CORPO EDITORIAL

Adicélia Rodrigues Souza - Graduada em Letras pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Adriano Rosa da Silva - Mestre em História Social pela Universidade Federal Fluminense.

Alessandro Sathler Leal da Silva - Doutor em Educação pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Alex Lourenço dos Santos - Doutorando em Geografia pela Universidade Federal de Catalão.

Aline Borba Alves - Mestra em Educação pela Universidade Estadual do Maranhão.

Amanda Pereira Moreira - Mestra em Letras pela Universidade Federal de Lavras.

Antonio Ismael Lopes de Sousa - Doutorando em Linguística e Literatura pela Universidade Federal do Norte do Tocantins.

Ayla de Jesus Moura - Mestra em Educação Física pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.

Bárbara Silvestre da Silva Pereira - Doutoranda em Enfermagem e Biociências pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro.

Bianca Martins Knap - Mestranda em Direito Econômico e Desenvolvimento pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Camila Aparecida da Silva Albach - Doutoranda em Ciências Sociais Aplicadas pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Carina Mandler Schmidmeier - Mestranda em Direito pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Carlos Adriano Martins - Doutor em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Cruzeiro do Sul.

Carolline Nunes Lopes - Mestra em Psicologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Cláudio Alberto de Sá Quirino - Mestre profissional em Administração Pública (PROFIAP) pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.

Damião Evangelista Rocha - Doutorando em Saúde e Desenvolvimento Humano pela Universidade La Salle - Canoas.

Daniel da Rocha Silva - Mestre em Letras pela Universidade Federal de Sergipe.

Daniel Rodrigues de Lima - Mestre em História pela Universidade Federal do Amazonas.

Diego Emanuel Veis Bentancourt - Mestre em Educação pela Universidade Federal de Santa Maria.

Diego Pinto de Oliveira - Mestre em Ciências Farmacêuticas pela Universidade Federal de Alfenas.

Elberto Teles Ribeiro - Mestrando em Geografia pela Universidade Federal da Grande Dourados.



Equiton Lorengian Grégio - Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal da Fronteira Sul.

Evaldo Batista Mariano Júnior - Doutorando em Educação pela Universidade de Uberaba.

Fábio Henrique de Souza Lacerda - Mestre em Educação pela Universidade do Estado de Mato Grosso.

Fabio José Antonio da Silva - Doutor em Educação Física pela Universidade Estadual de Londrina.

Fabricio do Nascimento Moreira - Doutorando em Administração pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Felipe Antônio da Silva - Graduado em Direito pelo Centro Universitário Unihorizontes.

Flávia Maria Silva Brito - Doutora em Recursos Florestais pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

Flávio Roberto Chaddad - Mestre em Educação Escolar pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Francisco Samuel Laurindo de Lima - Graduado em Licenciatura em Pedagogia pela Universidade Estadual do Ceará.

Francisco Welton Machado - Editor Independente - Graduado em Geografia pela Universidade Estadual do Piauí.

Gabriella de Moraes - Doutora em Direito pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Gleyson Martins Magalhães Reymão - Mestre Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação pelo Instituto Federal do Pará.

Glicerinaldo de Sousa Gomes - Doutorando em Educação pela Universidade Federal da Paraíba.

Gustavo Boni Minetto - Mestrando em Educação, Linguagens e Tecnologia pela Universidade Estadual de Goiás.

Gutemberg Rapôso da Silva Ferreira - Mestre em Linguística pela Universidade Federal do Tocantins de Porto Nacional.

João Vitor Silva Almeida - Graduado em Gestão de Cooperativas pela Universidade Federal do Tocantins.

Joelson Lopes da Paixão - Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria.

Joice Marisa Görgen Junqueira - Mestra em Educação pela Universidade La Salle - Canoas.

José Bruno Martins Leão - Doutor em Sistema Constitucional de Garantia de Direitos pela Instituição Toledo de Ensino.

José Carlos dos Santos Silva - Mestrando em Educação Física pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.



José Cláudio da Silva Júnior - Mestrando em Ciências da Saúde pela Universidade de Pernambuco.

José Henrique Rodrigues Machado - Doutor em Ciências Sociais - Programa de Performances Culturais, pela Universidade Federal de Goiás.

José Leonardo Diniz de Melo Santos - Mestre em Educação, Culturas e Identidades pela Universidade Federal Rural de Pernambuco.

José Marciel Araújo Porcino - Graduado em Pedagogia pela Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Brasil.

José Neto de Oliveira Felipe - Doutorando em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade de Passo Fundo.

José Ronaldo de Freitas Machado - Mestre em Educação pela Universidade de Uberaba.

Jungley de Oliveira Torres Neto - Doutor em Ciência da Religião pela Universidade Federal de Juiz de Fora.

Karyne Oliveira Coelho - Doutora em Ciência Animal pela Universidade Federal de Goiás.

Layse da Silva Vieira - Mestranda em Vigilância em Saúde pela Universidade Iguazu.

Lidiana da Cruz Pereira - Doutora em Educação pela Universidade do Vale do Itajaí.

Lidiane Álvares Mendes - Doutoranda em Estudos de Cultura Contemporânea pela Universidade Federal de Mato Grosso.

Luan Brenner da Costa - Editor Independente - Graduado em Enfermagem pela Fundação Herminio Ometto.

Lucas Matheus Araujo Bicalho - Mestrando em Historia pela Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES, Brasil.

Lucia Helena Santana Ferreira - Doutoranda em Direito pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Luciano Victor da Silva Santos - Mestrando em Hotelaria e Turismo pela Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Brasil.

Luzia Eleonora Rohr Balaj - Doutoranda em Música pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro.

Magno Fernando Almeida Nazaré - Mestre em Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão.

Maiara Martins Doná - Mestra em Educação pela Universidade de Sorocaba.

Maickon Willian de Freitas - Mestre em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.



Maikon Luiz Mirkoski - Mestre Profissional em Matemática em Rede Nacional pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Mailson Moreira dos Santos Gama - Doutorando em História pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Marcelo Bustamante Chilingue - Doutorando em Informática na Educação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Marcelo Carvalho da Conceição - Doutor em Biologia Estrutural e Funcional pela Universidade Federal de São Paulo.

Marcos Scarpioni - Doutorando em Ciência da Religião pela Universidade Federal de Juiz de Fora.

Maria da Luz Olegário - Doutora em Educação pela Universidade Federal da Paraíba.

Maria Nazaré Lopes Baracho - Doutoranda em Odontologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - Campus JK.

Marilha da Silva Bastos - Mestranda em Educação Brasileira pela Universidade Federal do Ceará.

Marinely Aparecida Clemente - Mestra em Direito pela Universidade do Oeste de Santa Catarina.

Mario Marcos Lopes - Doutorando em Educação pela Universidade Federal de São Carlos.

Marlon Messias Santana Cruz - Doutor em Memória: Linguagem e Sociedade pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Michael Douglas Alves dos Santos - Mestrando em Educação, Cultura e Territórios Semiáridos pela Universidade do Estado da Bahia.

Mirna Liz da Cruz - Editora Independente - Graduada em Odontologia pela Universidade Federal de Goiás.

Natan Gomes dos Santos - Graduado em Biomedicina pela Faculdade Madre Thais.

Newton Ataíde Meira - Mestrando em Desenvolvimento Social pela Universidade Estadual de Montes Claros.

Plinio da Silva Andrade - Mestrando em Ciências da Educação pela Universidade Leonardo Da Vinci.

Rafael José Kraisch - Doutorando em Neurociências pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Romário Silva Ribeiro - Doutorando em Educação pela Christian Business School.

Ryan Dutra Rodrigues - Editor Independente - Graduado em Psicologia pelo Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas.

Samuel Francisco Rabelo - Doutorando em Direitos Humanos pela Universidade Tiradentes.

Sebastião Lacerda de Lima Filho - Doutorando em Medicina Translacional pela Universidade Federal do Ceará.



Silvana Maria Aparecida Viana Santos - Mestra em Tecnologias Emergentes em Educação pela MUST University.

Silvio de Almeida Junior - Doutor em Promoção de Saúde pela Universidade de Franca.

Stefany Reis Marquioli - Mestra em História Social pela Universidade Estadual de Montes Claros.

Suely Maria da Silva - Mestra em Gestão Pública Para o Desenvolvimento do Nordeste pela Universidade Federal de Pernambuco.

Swelen Freitas Gabarron Peralta - Doutoranda em Educação pela Universidade Tuiuti do Paraná.

Talita Benedcta Santos Künast - Doutoranda em Biodiversidade e Biotecnologia pela Universidade Federal de Mato Grosso.

Tályta Carine da Silva Saraiva - Mestra em Agronomia pela Universidade Federal do Piauí.

Thiago Silva Prado - Doutor em Educação pela Universidade Estadual de Maringá.

Vinicius Valim Pereira - Doutor em Zootecnia pela Universidade Estadual de Maringá, UEM, Brasil.

Wilson Moura - Doutor em Psicologia pela Christian Business School.

Yohans de Oliveira Esteves - Doutor em Psicologia pela Universidade Salgado de Oliveira.

Zaqueu Henrique de Souza - Doutor em Geografia pela Universidade Federal de Jataí.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C569

Ciência e Tecnologia de Alimentos Aplicada à Saúde Humana [recurso eletrônico] / Bruna Carla Leite Viana ... [et al.]. – Curitiba, PR: Aurum Editora, 2026.
Dados eletrônicos (1 PDF).

ISBN 978-65-6223-041-3

1. Ciência. 2. Tecnologia de alimentos. 3. Saúde.
I. Viana, Bruna Carla Leite Viana. II. Ferreira, Bruna Mayara Roldão. III. Gomes, Elienae da Silva. IV. Keller, Flávia Teixeira. V. Título.

CDU 61:641

Catlogação na fonte: Bruna Heller (CRB10/2348)

Índices para catálogo sistemático:

1 Ciências da saúde 61

2 Alimentos 641

DOI: 10.63330/livroautoral822026-

Aurum Editora Ltda

CNPJ: 589029480001-12

contato@aurumeditora.com

(41) 98792-9544

Curitiba - Paraná



AUTORAS



Bruna Carla Leite Viana

Nutricionista, docente e pesquisadora, com trajetória acadêmica e profissional desenvolvida na interface entre a Nutrição, Ciência de Alimentos e Ciências da Saúde. Mestre e doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos da Universidade Estadual de Maringá, atua como docente no Centro Universitário Ingá, dedicando-se à formação científica, técnica e profissional de estudantes da área da Saúde. Sua atuação articula ensino, pesquisa, extensão universitária e prática clínica, tendo como eixo a compreensão das relações entre alimentação, funcionalidade dos alimentos e promoção da saúde. Desenvolve pesquisas voltadas à investigação de compostos bioativos, sistemas de encapsulação, emulsões estruturadas e desenvolvimento de produtos alimentícios inovadores, com especial interesse na aplicação da tecnologia de alimentos à proteção, à estabilidade e ao aproveitamento de substâncias de relevância nutricional. Na prática clínica, atua nas áreas de Nutrição Clínica e Esportiva, com ênfase em saúde, composição corporal e desempenho físico. Sua produção acadêmica fundamenta-se na integração entre ciência, inovação tecnológica e aplicabilidade profissional, buscando aproximar os avanços da Ciência de Alimentos das demandas contemporâneas da Nutrição e do cuidado integral em saúde.



Bruna Mayara Roldão Ferreira

Doutora em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá (2025) com atuação científica na área de Cereais e Amidos e no Processo de Extrusão de grãos. Mestre em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Paraná (2013), graduada em Engenharia de Alimentos pela UEM (2009), com especialização em Gestão de Pessoas (2016) e Vigilância Sanitária e Controle de Qualidade pela PUC/PR (2011). Possui ampla experiência na coordenação de projetos de extensão, com atuação nas indústrias de pequeno, médio e grande porte, e na administração pública através da Fundação Araucária (FA). Já atuou como docente e coordenadora de graduação e pós-graduação/ CCETA (Centro de Ciências Exatas, Tecnológicas e Agrárias) na Faculdade Cesumar Ponta Grossa-PR. Entre 2023 e 2024 foi Pesquisadora Intercambista (*Exchange Researcher*) no CIMO - Centro de Investigação de Montanha (*Mountain Research Center*) do IPB - Instituto Politécnico de Bragança (*Polytechnic Institute of Bragança*) em Portugal, através do Programa de Doutorado-Sanduiche no Exterior pela Capes/MEC. Atualmente é professora de graduação EAD de Engenharia de Alimentos na Vitru Educação e professora colaboradora dos cursos de Engenharia de Alimentos e Tecnologia de Alimentos na Universidade Estadual de Maringá, *campus* regional de Umuarama-Paraná.





Elienae da Silva Gomes

Doutora em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá (UEM), Mestre em Engenharia de Alimentos, Engenheira de Alimentos, Licenciada em Ciências Biológicas e Especialista em Gestão em Segurança Alimentar. Sua atuação científica concentra-se no desenvolvimento de alimentos funcionais e ingredientes bioativos, com pesquisas envolvendo prebióticos, probióticos, compostos bioativos e oligossacarídeos do leite humano (HMOs). Atuou como docente nos níveis médio, técnico e superior, e possui experiência na indústria de alimentos, atuando em gestão da qualidade, desenvolvimento de produtos e segurança dos alimentos. É autora e coautora de artigos científicos, capítulos de livros e organizadora de obras técnico-científicas na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos.



Flávia Teixeira Kéller

Nutricionista, graduada pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) em 2016. Mestra pelo Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Desenvolvimento Comunitário (PPGDC/UNICENTRO) em 2019. Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos da Universidade Estadual de Maringá (UEM) em 2024, com período de Doutorado Sanduíche no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), junto ao Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Portugal. Atualmente é professora adjunta e coordenadora do curso de Bacharelado em Nutrição (modalidades presencial e semipresencial) no Centro Universitário Ingá (UNINGÁ). Atua nas áreas de Ciência e Tecnologia de Alimentos, com ênfase em reaproveitamento de resíduos alimentares, desenvolvimento de farinhas alternativas e análises sensorial, nutricional, tecnológica, química e física de alimentos. Possui também experiência nas áreas de Unidades de Alimentação e Nutrição e Nutrição Social, com enfoque em estratégias interdisciplinares relacionadas à saúde, incluindo redução de sódio em alimentos e aumento do teor de fibras alimentares.



Joice Camila Martins da Costa

Doutora em Ciência de Alimentos e mestre em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá. Possui graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Amazonas. Atualmente, é Pesquisadora de Pós-Doutorado em Engenharia de Alimentos na Universidade Federal do Paraná. Desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão, com foco em desenvolvimento de novos produtos sustentáveis. É autora de trabalhos científicos e participa de projetos voltados à pesquisa e disseminação do conhecimento. Nesta obra, compartilha resultados de estudos, contribuindo para a formação de estudantes e profissionais da área.

**Luana Morais Antonini**

Técnica em Informática pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul (IFMS), Nutricionista, Especialista em Nutrição Clínica e Terapia Nutricional, Mestre em Ciência de Alimentos (UEM) e Doutoranda em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Durante o Mestrado, desenvolveu pesquisas voltadas ao Upcycling de alimentos, utilizando resíduos da indústria alimentícia para a criar novos produtos e contribuir para o fortalecimento da economia circular. Sua pesquisa atual concentra-se no desenvolvimento e na caracterização de oleogéis como alternativas às gorduras vegetais hidrogenadas contendo trans. É Revisora Científica de Periódicos Internacionais e Professora Voluntária no Ensino Superior, dedicando-se à pesquisa, ao ensino e ao desenvolvimento de soluções inovadoras para a Área de Alimentos e Nutrição.

**Simone Maria Altoé Porto**

Engenheira Agrônoma pela Universidade Estadual de Maringá (UEM/2000), com especialização em Gestão Ambiental pela Universidade Estadual de Maringá (UEM/2009). Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Estadual de Maringá (UEM/2007) e Mestre em Agroecologia pela Universidade Estadual de Maringá (UEM/2021). Atualmente é doutoranda em Ciência de Alimentos na Universidade Estadual de Maringá (UEM), com ingresso em 2025. Atua na área de Ciências Agrárias, com ênfase em Agronomia, Solos, Nutrição de Plantas, Agroecologia, Toxicologia, Gestão Ambiental e Ciência de Alimentos.

DEDICATÓRIA

A Deus, dono de toda ciência, sabedoria e poder, que nos conduz pela graça do conhecimento contínuo e nos capacita a alcançar nossos objetivos. Às mulheres da ciência que nos precederam, dedicando suas vidas ao conhecimento, à pesquisa e às descobertas para que hoje pudéssemos estar aqui, mas cujos nomes e obras permanecem desconhecidos ou esquecidos. A elas, expressamos nosso profundo respeito e reconhecimento.



PREFÁCIO

A Ciência e Tecnologia de Alimentos e a Promoção da Saúde Humana nunca foram tão estratégicas quanto nos dias atuais. Vivemos um cenário mundial marcado por dois desafios interligados: de um lado, o crescimento acentuado de doenças crônicas não transmissíveis, obesidade, diabetes tipo 2, enfermidades cardiovasculares e alguns tipos de câncer associadas em grande medida a padrões alimentares inadequados e ao consumo excessivo de produtos ultraprocessados; de outro, a necessidade premente de garantir segurança alimentar, nutricional e sustentável para a população.

Diante desse contexto, este livro, *Ciência e Tecnologia de Alimentos Aplicada à Saúde Humana*, surge como uma contribuição oportuna e essencial, reunindo conhecimentos atualizados, evidências científicas e perspectivas inovadoras que revelam como a tecnologia alimentar pode ser uma aliada indispensável, e não um risco, à saúde coletiva. Os capítulos aqui apresentados rompem com visões simplistas que associam todo processamento industrial a malefícios: ao contrário, demonstram que o avanço responsável da área permite não apenas garantir a segurança e a disponibilidade de alimentos, mas também desenvolver produtos que vão além da nutrição básica, prevenindo enfermidades e promovendo o bem-estar.

Um ponto alto desta publicação é seu caráter interdisciplinar: reúne conhecimentos de química, bioquímica, microbiologia, engenharia de alimentos, nutrição e saúde pública, sempre com foco na aplicação prática e na responsabilidade social e ambiental.

Este livro destina-se a estudantes, professores e pesquisadores dos cursos de Engenharia de Alimentos, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Nutrição, Saúde Pública, e áreas afins, bem como aos profissionais da indústria alimentícia, gestores de políticas públicas e todos aqueles que buscam compreender como a inovação tecnológica pode contribuir para uma alimentação mais saudável, segura e acessível.

Boa leitura.

Elisane da Silva Gomes
Doutora em Ciência de Alimentos, Engenheira de Alimentos



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	15
-------------------	----

CAPÍTULO 1 - CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS APLICADA À SAÚDE HUMANA

Elisane da Silva Gomes.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-001>

16-24

CAPÍTULO 2 - COMPOSTOS BIOATIVOS NA PROMOÇÃO DA SAÚDE: MECANISMOS DE AÇÃO, BIODISPONIBILIDADE E ESTRATÉGIAS TECNOLÓGICAS

Bruna Carla Leite Viana.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-002>

25-36

CAPÍTULO 3 - OLIGOSSACARÍDEOS DO LEITE HUMANO (HMOS): DA BIOSÍNTESE À APLICAÇÃO TECNOLÓGICA COMO INGREDIENTE FUNCIONAL NA PROMOÇÃO DA SAÚDE HUMANA

Elisane da Silva Gomes.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-003>

37-49

CAPÍTULO 4 - PROTEÍNAS ALTERNATIVAS E SUSTENTABILIDADE ALIMENTAR: PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS PARA A SAÚDE HUMANA

Simone Maria Altoé Porto.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-004>

50-59

CAPÍTULO 5 - TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA O DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS PROMOTORES DA SAÚDE

Joice Camila Martins da Costa.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-005>

60-75

CAPÍTULO 6 - EMULSÕES PICKERING ESTABILIZADAS COM β -CICLODEXTRINA: TECNOLOGIA EMERGENTE PARA ENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS E DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS ENRIQUECIDOS

Bruna Carla Leite Viana.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-006>

76-89

CAPÍTULO 7 - TECNOLOGIAS APLICADAS À FORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE NUTRICIONAL

Flávia Teixeira Keller.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-007>

90-100



CAPÍTULO 8 - UTILIZAÇÃO DE SEMENTES GERMINADAS E DO PROCESSO DE EXTRUSÃO COMO ALIADOS NO AVANÇO TECNOLÓGICO EM PSEUDOCEREAIS E LEGUMINOSAS

Bruna Mayara Roldão Ferreira.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-008>

.....101-105

CAPÍTULO 9 - VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA PRODUÇÃO DE INGREDIENTES FUNCIONAIS

Simone Maria Altoé Porto.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-009>

.....106-115

CAPÍTULO 10 - SUSTENTABILIDADE EM UNIDADES PRODUTORAS DE REFEIÇÕES: ESTRATÉGIAS DE GESTÃO AMBIENTAL, INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E ATUAÇÃO DO NUTRICIONISTA

Flávia Teixeira Kéller.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-010>

.....116-126

CAPÍTULO 11 - MICROBIOTA INTESTINAL, PREBIÓTICOS, PROBIÓTICOS E PÓS-BIÓTICOS: AVANÇOS CIENTÍFICOS E APLICAÇÕES NA PROMOÇÃO DA SAÚDE

Elisane da Silva Gomes.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-011>

.....127-136

CAPÍTULO 12 - EIXO INTESTINO-CÉREBRO: ALIMENTOS E SAÚDE MENTAL

Luana Moraes Antonini.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-012>

.....137-149

CAPÍTULO 13 - ALIMENTAÇÃO DO IDOSO: SARCOPENIA, DESNUTRIÇÃO E ADEQUAÇÃO NUTRICIONAL

Luana Moraes Antonini.

  <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-013>

.....150-158



APRESENTAÇÃO

A alimentação é o pilar fundamental para a saúde humana, a qualidade de vida e a sustentabilidade dos sistemas sociais e ambientais.

Esta obra reúne conhecimentos científicos atualizados sobre a relação entre a Ciência e Tecnologia de Alimentos e a Saúde Humana, consolidando-se como uma referência relevante para o avanço da área diante dos desafios contemporâneos da segurança alimentar, das doenças crônicas e da sustentabilidade dos sistemas alimentares. Ao longo de treze capítulos, são abordados temas que vão dos fundamentos dessa relação, compostos bioativos, oligossacarídeos do leite humano, proteínas alternativas, tecnologias emergentes e encapsulação, passando por fortificação alimentar, extrusão de pseudocereais, aproveitamento de resíduos agroindustriais e sustentabilidade em unidades produtoras de refeições, até microbiota intestinal, eixo intestino-cérebro e nutrição do idoso, oferecendo a pesquisadores, profissionais e estudantes uma visão ampla e alinhada às demandas contemporâneas.

Esperamos que este material estimule a reflexão e a inovação, contribuindo para sistemas alimentares mais equitativos, resilientes e promotores de saúde.

Desejamos uma excelente leitura.



CAPÍTULO 1

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS APLICADA À SAÚDE HUMANA

FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY APPLIED TO HUMAN HEALTH

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-001>

Resumo

A ciência e tecnologia de alimentos compreende um conjunto de conhecimentos interdisciplinares que integra princípios das ciências biológicas, químicas, físicas e de engenharia para o estudo, processamento, conservação e distribuição de alimentos seguros e nutritivos. No contexto contemporâneo, marcado pela elevada prevalência de doenças crônicas não transmissíveis (DCNT), obesidade e insegurança alimentar, a interface entre a tecnologia de alimentos e a saúde humana torna-se cada vez mais relevante. Este capítulo apresenta uma revisão narrativa acerca dos fundamentos científicos que sustentam essa relação, abordando desde os impactos dos processos tecnológicos sobre a composição nutricional dos alimentos até o papel dos compostos bioativos, alimentos funcionais, probióticos e prebióticos na manutenção da saúde e prevenção de doenças. Discute-se ainda a influência dos alimentos ultraprocessados sobre o estado de saúde da população, bem como as perspectivas inovadoras da área, incluindo nanotecnologia, biotecnologia e nutrição personalizada. Conclui-se que o avanço responsável da ciência e tecnologia de alimentos, orientado por evidências científicas sólidas e pelos princípios da sustentabilidade e equidade, representa um caminho promissor para a promoção da saúde humana em escala global.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; Compostos bioativos; Doenças crônicas não transmissíveis; Microbiota intestinal; Processamento de alimentos; Saúde humana; Tecnologia de alimentos.

Abstract

Food science and technology comprises an interdisciplinary body of knowledge that integrates principles from the biological, chemical, physical and engineering sciences applied to the study, processing, preservation and distribution of safe and nutritious food. In the contemporary context, marked by a high prevalence of non-communicable chronic diseases, obesity and food insecurity, the interface between food technology and human health becomes increasingly relevant. This chapter presents a narrative review of the scientific foundations that underpin this relationship, addressing the impact of technological processes on the nutritional composition of foods, the role of bioactive compounds, functional foods, probiotics and prebiotics in health maintenance and disease prevention, as well as the influence of ultra-processed foods on population health. Innovative perspectives in the field are also discussed, including nanotechnology, biotechnology and personalized nutrition. It is concluded that the responsible advancement of food science

and technology, guided by solid scientific evidence and by the principles of sustainability and equity, represents a promising path toward promoting human health on a global scale.

Keywords: Bioactive compounds; Food processing; Food technology; Functional foods; Gut microbiota; Human health; Non-communicable chronic diseases.

1 INTRODUÇÃO

A ciência e tecnologia de alimentos constitui um campo do conhecimento em constante expansão, cuja relevância para a saúde pública tem sido amplamente reconhecida nas últimas décadas. Sua interface com a saúde humana é multifacetada e envolve desde a composição nutricional dos alimentos in natura até os efeitos das transformações tecnológicas sobre a biodisponibilidade de nutrientes e a presença de compostos bioativos.

O processamento de alimentos pode ser compreendido como uma "faca de dois gumes": ao mesmo tempo em que viabilizou o abastecimento seguro e estável de alimentos para populações urbanas, o avanço dos produtos ultraprocessados trouxe consequências negativas para a saúde pública. Essa tensão entre inovação tecnológica e saúde nutricional coloca a ciência de alimentos no centro de debates contemporâneos sobre alimentação e medicina preventiva (Mellor, 2024).

O cenário epidemiológico global reforça essa urgência. Doenças cardiovasculares, diabetes tipo 2, obesidade e alguns tipos de câncer estão diretamente relacionados a padrões alimentares inadequados e ao consumo excessivo de alimentos industrializados. Nesse contexto, a compreensão aprofundada dos mecanismos pelos quais os processos tecnológicos afetam a qualidade nutricional dos alimentos torna-se essencial para a formulação de políticas de saúde eficazes e para o desenvolvimento de produtos alimentícios mais saudáveis.

Por outro lado, a ciência de alimentos também tem contribuído de forma expressiva para o desenvolvimento de alimentos funcionais, enriquecidos com compostos bioativos capazes de exercer efeitos benéficos sobre a saúde humana além da nutrição básica. Revisões recentes demonstram que compostos como polifenóis, carotenoides, ácidos graxos ômega-3 e probióticos apresentam potencial terapêutico contra inflamação, estresse oxidativo e disfunção metabólica. Adicionalmente, os avanços no campo da nutrigenômica e da nutrição de precisão prometem revolucionar a forma como a tecnologia de alimentos será aplicada à saúde individual no futuro próximo (Arshad *et al.*, 2025).

Diante desse panorama, o presente capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão dos principais conceitos, evidências científicas e perspectivas que fundamentam a relação entre ciência e tecnologia de alimentos e saúde humana. Para tanto, foram consultadas bases de dados científicas como ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Scopus e Wiley, com ênfase em publicações dos últimos cinco anos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS E QUALIDADE NUTRICIONAL

Os processos tecnológicos aplicados aos alimentos têm como objetivo primordial garantir a segurança microbiológica, estender a vida útil e melhorar características sensoriais. No entanto, tais processos podem impactar significativamente o valor nutricional dos produtos. Técnicas como pasteurização, esterilização, secagem e cocção podem resultar em perdas variáveis de vitaminas termossensíveis, minerais e compostos bioativos.

Pesquisa investigou o impacto de métodos emergentes de processamento, como ultrassom e campo elétrico pulsado, sobre as propriedades nutricionais de tecidos vegetais. Os resultados indicaram que tecnologias não térmicas preservam com maior eficiência a integridade dos compostos bioativos em comparação com processos convencionais baseados em calor. Estudos mais recentes corroboram essa tendência, apontando que tecnologias de processamento minimamente invasivas são estratégias promissoras para a produção de alimentos que aliam segurança, conveniência e qualidade nutricional (Matys *et al.*, 2021).

A classificação NOVA, proposta por Monteiro e colaboradores, tornou-se uma ferramenta amplamente utilizada para categorizar alimentos com base no grau e na finalidade do processamento industrial. Segundo essa classificação, alimentos ultraprocessados (grupo 4) são formulações industriais que contêm ingredientes raramente utilizados em preparações culinárias domésticas, como aditivos, corantes, emulsificantes e outros aditivos tecnológicos. Revisão sistemática demonstrou associação entre o consumo desse grupo de alimentos e o aumento do risco de obesidade, diabetes tipo 2, doenças cardiovasculares e mortalidade geral (Ultraprocessed foods, 2021).

2.2 COMPOSTOS BIOATIVOS E ALIMENTOS FUNCIONAIS

O conceito de alimento funcional surgiu no Japão na década de 1980, quando agências governamentais iniciaram a aprovação de alimentos com benefícios comprovados à saúde. Atualmente, alimentos funcionais são definidos como produtos que, além de nutrir, exercem efeitos fisiológicos benéficos específicos por meio de compostos bioativos como polifenóis, carotenoides, ácidos graxos poli-insaturados, peptídeos bioativos, probióticos e prebióticos (Arshad *et al.*, 2025).

Revisão destacou que compostos bioativos de origem vegetal, animal e microbiana modulam vias moleculares relacionadas à inflamação, ao estresse oxidativo, à disfunção metabólica e ao equilíbrio da microbiota intestinal. Dentre os compostos mais estudados, destacam-se os flavonoides, ácidos fenólicos, carotenoides e ácidos graxos ômega-3, cujos efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e anticarcinogênicos foram demonstrados em estudos *in vitro*, modelos animais e ensaios clínicos.

Contudo, a aplicação de compostos bioativos em alimentos funcionais enfrenta desafios

significativos relacionados à biodisponibilidade, instabilidade química e dificuldades de liberação controlada. Tais limitações decorrem da baixa solubilidade, susceptibilidade à degradação gastrointestinal e metabolismo acelerado desses compostos. Para superar essas barreiras, estratégias de funcionalização como a encapsulação em nano e microestruturas têm sido amplamente investigadas, com resultados promissores para a manutenção da bioatividade e para a entrega controlada de compostos bioativos em sítios específicos do trato gastrointestinal.

2.3 MICROBIOTA INTESTINAL, PROBIÓTICOS E PREBIÓTICOS

A microbiota intestinal humana é composta por mais de 1.000 espécies de microrganismos que desempenham funções essenciais nos processos fisiológicos, metabólicos e imunológicos do organismo. O desequilíbrio dessa comunidade microbiana, denominado disbiose, está associado ao desenvolvimento de diversas condições patológicas, incluindo doenças inflamatórias intestinais, obesidade, diabetes tipo 2 e transtornos mentais.

Revisão sistematizou as evidências sobre o impacto de prebióticos, probióticos, simbióticos e pós-bióticos na saúde intestinal, destacando que esses compostos modulam a composição e a função da microbiota por meio de mecanismos distintos e complementares. Os probióticos atuam pela colonização transitória do intestino, competindo com patógenos e produzindo metabólitos benéficos como ácidos graxos de cadeia curta (AGCC). Os prebióticos, por sua vez, funcionam como substratos fermentáveis que estimulam seletivamente o crescimento de microrganismos benéficos (Sokolic *et al.*, 2025).

Estudo demonstrou que cepas probióticas utilizadas na indústria alimentícia, como *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, contribuem para a sustentabilidade da saúde e para a atenuação de condições como inflamação intestinal e câncer de cólon (Dahiya e Nigam, 2022). Adicionalmente, pesquisa evidenciou o papel sinérgico de prebióticos e probióticos na modulação da microbiota intestinal, com aplicações clínicas no manejo de doenças renais crônicas, síndrome metabólica e transtornos gastrointestinais (Kumari *et al.*, 2024).

2.4 ALIMENTOS ULTRAPROCESSADOS E DOENÇAS CRÔNICAS

A associação entre o consumo de alimentos ultraprocessados e o aumento da incidência de doenças crônicas não transmissíveis (DCNT) constitui um dos temas mais estudados na ciência de alimentos contemporânea. Meta-análises e revisões sistemáticas têm consistentemente demonstrado que o consumo elevado de ultraprocessados está correlacionado com maior risco de obesidade, hipertensão arterial, dislipidemia, diabetes tipo 2, doenças cardiovasculares e alguns tipos de câncer.

Revisão sistemática analisou 998 estudos sobre a disponibilidade de alimentos ultraprocessados e DCNT, concluindo que a maior disponibilidade domiciliar desses produtos está associada a piores

desfechos de saúde na população (Araújo *et al.*, 2021). Revisão aprofundou essa análise destacando que os mecanismos pelos quais os ultraprocessados contribuem para as DCNT incluem resistência à insulina, doença hepática gordurosa, hipertensão, disrupção hormonal e inflamação crônica de baixo grau (Kinkif, 2024).

A revisão ressalta ainda que a tecnologia de alimentos tem papel fundamental na busca por soluções que reduzam o impacto negativo dos ultraprocessados, por meio do desenvolvimento de matrizes alimentares mais saudáveis, da substituição de ingredientes problemáticos e da aplicação de tecnologias de processamento que preservem ou melhorem o perfil nutricional dos produtos industrializados (Mellor, 2024).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 IMPACTO DAS TECNOLOGIAS DE CONSERVAÇÃO SOBRE NUTRIENTES

As tecnologias de conservação de alimentos englobam métodos físicos, químicos e biológicos que visam inibir o crescimento microbiano e retardar reações deteriorativas. Entre os métodos mais tradicionais, encontram-se o tratamento térmico (pasteurização e esterilização), a refrigeração, o congelamento e a secagem. Métodos emergentes não térmicos, como alta pressão hidrostática (HPH), campo elétrico pulsado (CEP), luz ultravioleta e plasma frio, têm ganhado destaque por apresentarem menor impacto sobre nutrientes e compostos bioativos.

O processamento térmico convencional, embora eficaz na inativação de patógenos, provoca degradação variável de vitaminas termossensíveis, como a vitamina C, tiamina e folato, além de modificar a estrutura de proteínas e lipídios. Por outro lado, algumas reações termicamente induzidas, como a reação de Maillard, podem resultar na formação de compostos com atividade antioxidante, embora também possam gerar subprodutos indesejáveis como acrilamida e furano em determinadas condições de processamento.

Tecnologias de encapsulação e nanoencapsulação têm sido aplicadas para proteger compostos bioativos sensíveis durante o processamento e o armazenamento, bem como para melhorar sua biodisponibilidade. Polímeros como alginato de sódio, quitosana, pectina e celulose têm sido utilizadas em técnicas como spray-drying, liofilização e coacervação para encapsular compostos como polifenóis, carotenoides e ácidos graxos ômega-3, preservando sua atividade biológica e permitindo a liberação controlada no trato gastrointestinal.

3.2 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA ALIMENTOS MAIS SAUDÁVEIS

O desenvolvimento de novos produtos alimentícios com perfil nutricional melhorado é um dos principais desafios e oportunidades da ciência e tecnologia de alimentos atual. Estratégias como a

reformulação de produtos para redução de sódio, açúcares e gorduras saturadas, e o enriquecimento com fibras, proteínas de alto valor biológico e compostos bioativos têm sido amplamente exploradas pela indústria alimentícia em resposta à crescente demanda dos consumidores por alimentos mais saudáveis.

A fermentação, uma das tecnologias alimentares mais antigas da humanidade, tem experimentado um notável ressurgimento científico. Alimentos fermentados como iogurte, kefir, kombucha e vegetais lactofermentados não apenas apresentam maior digestibilidade e disponibilidade de nutrientes, como também contêm microrganismos vivos com efeitos probióticos comprovados. Pesquisa publicada na *Food Bioengineering* (Kumari *et al.*, 2024) evidenciou que simbióticos (combinações de probióticos e prebióticos) exercem efeitos sinérgicos na modulação da microbiota intestinal, com implicações positivas para a imunidade, o metabolismo lipídico e a saúde mental.

A biotecnologia alimentar, incluindo o uso de organismos geneticamente modificados (OGMs) e a edição gênica por CRISPR-Cas9, representa uma fronteira inovadora com potencial para o desenvolvimento de cultivares com maior teor de nutrientes, resistência a pragas e melhor adaptação climática. No entanto, questões regulatórias, éticas e de aceitação pelo consumidor ainda representam barreiras importantes para a adoção em larga escala dessas tecnologias.

3.3 NUTRIÇÃO DE PRECISÃO E PERSONALIZAÇÃO ALIMENTAR

O avanço das tecnologias ômicas (genômica, metabolômica, proteômica e microbiômica) tem aberto caminho para uma nova era da nutrição: a nutrição de precisão ou personalizada. Essa abordagem reconhece que as respostas fisiológicas aos alimentos variam significativamente entre indivíduos em função de fatores genéticos, epigenéticos, da composição da microbiota intestinal e do estilo de vida.

A nutrigenômica, subcampo que estuda as interações entre nutrientes e expressão gênica, tem demonstrado que compostos alimentares específicos podem modular a expressão de genes relacionados à inflamação, ao metabolismo lipídico e ao controle glicêmico. Esses conhecimentos têm impulsionado o desenvolvimento de alimentos funcionais direcionados a populações específicas e a condições clínicas particulares, como síndrome metabólica, doenças inflamatórias intestinais e distúrbios neurológicos.

Revisão publicada na *ScienceDirect* (2025) destacou que avanços nas tecnologias ômicas, combinados com inteligência artificial e big data, estão permitindo a identificação de padrões moleculares que conectam a composição da dieta à saúde humana com precisão sem precedentes. Essa perspectiva promete transformar a produção de alimentos, direcionando o desenvolvimento tecnológico para produtos que atendam às necessidades nutricionais específicas de diferentes grupos populacionais.

3.4 SEGURANÇA ALIMENTAR COMO FUNDAMENTO DA SAÚDE

A segurança microbiológica e química dos alimentos é um pré-requisito indispensável para a

promoção da saúde humana. Doenças transmitidas por alimentos (DTAs) representam um importante problema de saúde pública global, causando estimados 600 milhões de casos e 420 mil mortes anuais, segundo dados da Organização Mundial da Saúde (OMS). Além dos agentes microbiológicos, contaminantes químicos como pesticidas, micotoxinas, metais pesados e substâncias migradas de embalagens constituem riscos significativos à saúde do consumidor.

Nesse contexto, a tecnologia de alimentos desempenha papel central no desenvolvimento e na implementação de sistemas de controle de qualidade e segurança, como o APPCC (Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle), tecnologias de barreira e embalagens ativas e inteligentes. A rotulagem nutricional adequada e a legislação alimentar baseada em evidências científicas são também componentes essenciais para garantir que os consumidores tenham acesso a informações fidedignas e possam fazer escolhas alimentares conscientes.

4 CONCLUSÃO

A ciência e tecnologia de alimentos configura-se como um campo estratégico para a promoção da saúde humana no século XXI. As evidências acumuladas nas últimas décadas demonstram de forma inequívoca que os processos tecnológicos aplicados aos alimentos exercem influência direta e determinante sobre a qualidade nutricional dos produtos, a biodisponibilidade de nutrientes e compostos bioativos, e, consequentemente, sobre a saúde das populações.

O desenvolvimento de alimentos funcionais enriquecidos com compostos bioativos como polifenóis, probióticos, prebióticos e ácidos graxos ômega-3 representa uma das contribuições mais promissoras da tecnologia de alimentos para a prevenção e o manejo de DCNT. Ao mesmo tempo, o crescente consumo de alimentos ultraprocessados impõe desafios urgentes que demandam respostas tanto do setor produtivo, por meio da reformulação de produtos, quanto das políticas públicas de saúde e alimentação.

As perspectivas futuras apontam para uma integração crescente entre a tecnologia de alimentos, a biologia molecular, a inteligência artificial e a medicina de precisão, viabilizando o desenvolvimento de alimentos personalizados que atendam às necessidades nutricionais individuais com base no perfil genético, metabólico e da microbiota intestinal de cada pessoa. Para que esse potencial se concretize de forma equitativa e sustentável, é fundamental que a pesquisa e o desenvolvimento em ciência e tecnologia de alimentos sejam orientados pelos princípios da saúde pública, da sustentabilidade ambiental e da justiça alimentar.

Em síntese, a consolidação de uma ciência e tecnologia de alimentos comprometida com a saúde humana requer um esforço colaborativo entre pesquisadores, profissionais de saúde, indústria alimentícia, reguladores e consumidores, sustentado por evidências científicas sólidas e pelo compromisso ético

com o bem-estar da sociedade.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Nesse manuscrito para aprimorar a linguagem da escrita e revisão e apoio na redação foi utilizado a ferramenta de inteligência artificial Claude (Anthropic) .

Todo o conteúdo científico foi supervisionado, revisado e validado pela autora, que assume total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, T. P. de *et al.* Ultra-Processed Food Availability and Noncommunicable Diseases: A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 14, p. 7382, 10 jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147382>.
- ARSHAD, M. S. *et al.* Functional Foods Enriched With Bioactive Compounds: Therapeutic Potential and Technological Innovations. **Food Science & Nutrition**, v. 13, n. 1, p. e71024, out. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.71024>.
- BHUTADA, S. *et al.* A Comprehensive Review of Probiotics and Human Health: Current Prospective and Applications. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1487641, 6 jan. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1487641>.
- DAHIYA, D.; NIGAM, P. S. The Gut Microbiota Influenced by the Intake of Probiotics and Functional Foods with Prebiotics Can Sustain Wellness and Alleviate Certain Ailments like Gut-Inflammation and Colon-Cancer. **Microorganisms**, v. 10, n. 3, p. 665, 20 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030665>.
- KINKIF, A. B. Contribution of Ultra-Processed Foods to Increased Obesity and Non-Communicable Diseases. **Food Science and Nutrition**, v. 12, n. 12, p. 2438405, 11 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2438405>.
- KUMARI, R. *et al.* Synergistic Role of Prebiotics and Probiotics in Gut Microbiome Health: Mechanisms and Clinical Applications. **Food Bioengineering**, v. 3, n. 4, p. 1–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/fbe2.12107>.
- MATYS, A. *et al.* Influence of Ultrasound and the Conditions of Convective Drying with Dehumidified Air on the Course of the Process and Selected Properties of Apple Tissue. **Foods**, v. 10, n. 3, p. 611, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11030611>.
- MELLOR, D. D. The Role of Food Science and Technology in Navigating the Health Issues of Ultra-Processed Foods. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 59, n. 4, p. 17126, 11 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.17126>.
- PEREIRA, I. O. *et al.* A Review on the Influence of Nutraceuticals and Functional Foods on Health. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100145, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100145>.

RIVERA-PINTO, M. *et al.* Natural Sources of Bioactive Compounds: Recent Advances in Isolation, Functionalization, and Health Benefits. **Food Research International**, v. 198, p. 115919, nov. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115919>.

SERNA-COCK, L. *et al.* Functional Importance of Bioactive Compounds of Foods With Potential Health Benefits: A Review on Recent Trends. **Food Bioscience**, v. 44, p. 101398, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101398>.

SOKOLIC, L. *et al.* A Review of the Influence of Prebiotics, Probiotics, Synbiotics, and Postbiotics on the Human Gut Microbiome and Intestinal Integrity. **Journal of Clinical Medicine**, v. 14, n. 11, p. 3673, 23 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm14113673>.

TOPOLSKA, K. *et al.* Plant-Based Functional Foods for Healthy Aging: Current Trends, Bioactive Compounds, and Future Perspectives. **Trends in Food Science & Technology**, v. 156, p. 104872, fev. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.104872>.

ZHENG, Y. *et al.* The Modulatory Role of Bioactive Compounds in Functional Foods on Inflammation and Metabolic Pathways in Chronic Diseases. **Nutrients**, v. 17, n. 6, p. 1022, mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu17061022>.

CAPÍTULO 2

COMPOSTOS BIOATIVOS NA PROMOÇÃO DA SAÚDE: MECANISMOS DE AÇÃO, BIODISPONIBILIDADE E ESTRATÉGIAS TECNOLÓGICAS

BIOACTIVE COMPOUNDS IN HEALTH PROMOTION: MECHANISMS OF ACTION, BIOAVAILABILITY, AND TECHNOLOGICAL STRATEGIES

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-002>

Resumo

Os compostos bioativos como os polifenóis, carotenoides, fitosteróis e os ácidos graxos poli-insaturados entre outros, são constituintes não essenciais da dieta capazes de modular processos fisiológicos e de contribuir para a prevenção de doenças crônicas não transmissíveis. Esta revisão teve como objetivo analisar os mecanismos de ação biológica dos compostos bioativos, os fatores limitantes de sua biodisponibilidade e as principais estratégias tecnológicas empregadas para sua proteção e veiculação em alimentos. A metodologia consistiu em revisão narrativa da literatura, realizada nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, LILACS e SciELO. A análise evidenciou que os compostos bioativos atuam por mecanismos diversos, através da atividade antioxidante direta, modulação da via Nrf2/Keap1, ação anti-inflamatória, interação com a microbiota intestinal e efeitos hipocolesterolêmicos, com evidências robustas de contribuição para a saúde cardiometabólica, imunológica e digestiva. Entretanto, a baixa solubilidade aquosa, a instabilidade físico-química frente a oxigênio, luz, calor e pH, e a intensa biotransformação gastrointestinal restringem substancialmente sua biodisponibilidade oral, o que compromete a tradução do potencial biológico *in vitro* em benefícios clínicos consistentes. Nesse contexto, sistemas de encapsulação, incluindo emulsões Pickering estabilizadas por partículas biopoliméricas, complexos de inclusão e alimentos excipientes desenhados para modular a digestão despontam como estratégias tecnológicas capazes de superar essas limitações, protegendo os compostos bioativos ao longo do processamento e do trato gastrointestinal. Conclui-se que a efetividade biológica dos compostos bioativos depende tanto de sua natureza química quanto do desenho tecnológico da matriz alimentar que os veicula, reforçando a relevância de abordagens interdisciplinares que integrem ciência de alimentos, tecnologia de encapsulação e nutrição para a promoção da saúde por meio de alimentos enriquecidos e funcionais.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; Biodisponibilidade; Compostos bioativos; Encapsulação; Promoção da saúde.

Abstract

Bioactive compounds, including polyphenols, carotenoids, phytosterols, and polyunsaturated fatty acids, are non-essential dietary constituents capable of modulating physiological processes and potentially

contributing to the prevention of non-communicable chronic diseases. This review aimed to examine the biological mechanisms of action of bioactive compounds, the main factors limiting their bioavailability, and the technological strategies employed to protect and deliver these compounds through food matrices. A narrative literature review was conducted using Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, LILACS, and SciELO databases. The available evidence indicates that bioactive compounds exert their effects through multiple and interconnected mechanisms, including direct antioxidant activity, modulation of the Nrf2/Keap1 signaling pathway, regulation of inflammatory responses, interactions with the gut microbiota, and cholesterol-lowering effects. These mechanisms have been associated with potential benefits for cardiometabolic, immune, and gastrointestinal health. However, poor aqueous solubility, physicochemical instability under exposure to oxygen, light, heat, and pH variations, as well as extensive gastrointestinal biotransformation, substantially limit oral bioavailability and hinder the translation of biological effects observed in vitro into consistent clinical outcomes. In this context, encapsulation systems, including Pickering emulsions stabilized by biopolymeric particles, inclusion complexes, and excipient foods designed to modulate digestion, have emerged as promising technological approaches to overcome these limitations by protecting bioactive compounds during food processing and gastrointestinal transit. Overall, the biological effectiveness of bioactive compounds depends not only on their chemical nature but also on the technological design of the food matrix used for their delivery. These findings reinforce the importance of interdisciplinary approaches integrating food science, encapsulation technology, and nutrition to support the development of enriched and functional foods aimed at promoting human health.

Keywords: Bioactive compounds; Bioavailability; Encapsulation; Functional foods; Health promotion.

1 INTRODUÇÃO

As doenças crônicas não transmissíveis (DCNT) representam uma das principais causas de mortalidade mundial, respondendo por aproximadamente 74% dos óbitos registrados anualmente, o equivalente a mais de 40 milhões de mortes. Parte substancial dessa carga está associada a fatores de risco modificáveis, entre os quais se destacam os padrões alimentares inadequados (World Health Organization, 2023). Esse cenário tem impulsionado o interesse científico e tecnológico pelo desenvolvimento de alimentos capazes de oferecer benefícios à saúde para além do atendimento às necessidades nutricionais básicas.

Nesse contexto, os compostos bioativos têm recebido atenção crescente devido à sua capacidade potencial de interferir em processos fisiológicos e metabólicos relevantes. Esses constituintes, embora não sejam considerados nutrientes essenciais, podem modular vias de sinalização celular, mecanismos antioxidantes endógenos, metabolismo lipídico e glicídico e respostas inflamatórias (Biesalski *et al.*, 2009;

Shahidi; Ambigaipalan, 2015). Entre as principais classes de compostos bioativos encontram-se os polifenóis, carotenoides, fitosteróis, ácidos graxos poli-insaturados e compostos organossulfurados, cujas propriedades dependem de sua estrutura química, concentração, biodisponibilidade e interação com a matriz alimentar.

A valorização desses constituintes tem contribuído para a expansão do campo dos alimentos funcionais, geralmente compreendidos como alimentos ou componentes alimentares que, quando consumidos como parte de uma dieta habitual, podem exercer efeitos fisiológicos benéficos além de suas funções nutricionais convencionais. Esses efeitos têm sido relacionados à manutenção da homeostase, à modulação de fatores de risco metabólicos e ao possível auxílio na prevenção de doenças crônicas (Granato *et al.*, 2020).

Entretanto, a atividade biológica *in vitro* dos compostos bioativos nem sempre se traduz em benefício clínico proporcional, uma vez que sua eficácia depende criticamente da biodisponibilidade, ou seja, a fração do composto ingerido efetivamente alcança a circulação sistêmica em forma biologicamente ativa (Manach *et al.*, 2004). Fatores como baixa solubilidade, instabilidade físico-química frente a oxigênio, luz, calor e variações de pH, biotransformação hepática e intestinal extensiva, e interação com a microbiota colônica restringem substancialmente essa fração, configurando um dos principais gargalos tecnológicos e nutricionais da área (McClements; Xiao, 2014; Cardona *et al.*, 2013).

Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas de encapsulação e de matrizes alimentares especificamente desenhadas para proteger e veicular compostos bioativos como por exemplo as emulsões Pickering estabilizadas por partículas biopoliméricas, configura-se como estratégia tecnológica para reconciliar o potencial biológico desses compostos com sua efetiva disponibilidade fisiológica, contribuindo para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos, funcionais e comprometidos com a promoção da saúde.

Diante do exposto, o presente capítulo tem como objetivo analisar, por meio de revisão narrativa da literatura, os mecanismos de ação biológica dos principais compostos bioativos de interesse nutricional, os fatores que limitam sua biodisponibilidade e as estratégias tecnológicas empregadas para sua proteção e veiculação em alimentos. Especificamente, discutem-se: (I) a classificação e as principais classes de compostos bioativos; (II) os mecanismos moleculares e fisiológicos de ação; (III) as contribuições específicas de compostos fenólicos, carotenoides e ácidos graxos poli-insaturados para a saúde cardiometabólica, imunológica e digestiva; (IV) os fatores limitantes da biodisponibilidade oral; (V) as estratégias tecnológicas de encapsulação e proteção; e (VI) as perspectivas para sua incorporação em alimentos funcionais e enriquecidos de próxima geração.

2 METODOLOGIA

Trata-se de revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, conduzida conforme a estrutura metodológica descrita por Rother (2007) e Mattos (2015), com o propósito de reunir, organizar e discutir os mecanismos de ação, à biodisponibilidade e às estratégias tecnológicas de proteção de compostos bioativos de interesse para a saúde humana.

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, LILACS e SciELO. Empregaram-se combinações dos descritores “*bioactive compounds*”, “*polyphenols*”, “*carotenoids*”, “*polyunsaturated fatty acids*”, “*bioavailability*”, “*oxidative stress*”, “*gut microbiota*”, “*functional foods*”, “*encapsulation*” e “*health promotion*”, e seus equivalentes em português, articulados pelos operadores *AND* e *OR*.

Foram incluídos artigos originais, revisões de literatura, capítulos de livros, consensos de sociedades científicas e documentos internacionais, publicados preferencialmente entre 2013 e 2025, período que concentra o avanço mais expressivo da compreensão mecanística sobre compostos bioativos e biodisponibilidade. Consideraram-se também estudos clássicos anteriores a esse período quando essenciais ao suporte teórico ou conceitual (notadamente Manach *et al.*, 2004). Foram excluídos estudos cujo objeto exclusivo fosse a síntese química de compostos isolados sem relação com matrizes alimentares, trabalhos fora do escopo de nutrição e ciência de alimentos, e publicações com informações insuficientes sobre mecanismos de ação ou sobre biodisponibilidade.

A análise foi conduzida de forma descritiva e interpretativa, organizando-se as evidências em eixos temáticos: (a) classificação e principais classes de compostos bioativos; (b) mecanismos moleculares e fisiológicos de ação; (c) contribuições para a saúde cardiometabólica, imunológica e digestiva; (d) fatores limitantes da biodisponibilidade oral; (e) estratégias tecnológicas de encapsulação e proteção; e (f) perspectivas e desafios para a incorporação em alimentos funcionais e enriquecidos.

Durante a preparação deste capítulo, o ChatGPT (OpenAI, GPT 5.6) foi utilizado exclusivamente como ferramenta de apoio à organização textual e ao aprimoramento linguístico da redação. A ferramenta não foi empregada na concepção do estudo, na geração ou análise dos dados, na interpretação dos resultados nem na formulação das conclusões. Todo o conteúdo produzido com seu auxílio foi criticamente revisado e editado pela autora, que assume integral responsabilidade pela exatidão, originalidade e integridade do conteúdo, bem como pela versão final do manuscrito.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CLASSIFICAÇÃO E PRINCIPAIS CLASSES DE COMPOSTOS BIOATIVOS

Os compostos bioativos são tradicionalmente classificados segundo sua origem química e estrutura molecular em cinco grandes grupos: compostos fenólicos, carotenoides, fitosteróis, ácidos graxos poli-

insaturados e compostos nitrogenados bioativos, categoria que engloba peptídeos bioativos, alcaloides e glucosinolatos (Shahidi; Ambigaipalan, 2015; Biesalski *et al.*, 2009). Os compostos fenólicos constituem o grupo mais numeroso e estruturalmente diverso, compreendendo desde ácidos fenólicos simples até flavonoides, estilbenos e taninos condensados de alto peso molecular, presentes em frutas, hortaliças, cereais integrais, chá e cacau (Manach *et al.*, 2004).

Os carotenoides, pigmentos isoprenoides lipossolúveis responsáveis pela coloração amarela, laranja e vermelha de diversos alimentos vegetais, dividem-se em carotenos (β -caroteno, licopeno) e xantofilas (luteína, zeaxantina, astaxantina), com relevância nutricional adicional para os carotenoides pró-vitamínicos A, precursores do retinol (Fiedor; Burda, 2014). Os fitosteróis, estruturalmente análogos ao colesterol, compreendem sitosterol, campesterol e estigmasterol, amplamente distribuídos em óleos vegetais, oleaginosas e leguminosas (Gylling *et al.*, 2014).

Os ácidos graxos poli-insaturados de cadeia longa da série ômega-3, ácido eicosapentaenoico (EPA) e ácido docosa-hexaenoico (DHA), de origem marinha, e o ácido α -linolênico (ALA), de origem vegetal, completam o quadro dos compostos lipídicos bioativos de maior relevância clínica (Calder, 2015). Essa diversidade estrutural determina, em larga medida, as propriedades físico-químicas de cada classe, como polaridade, solubilidade, estabilidade térmica e oxidativa, condicionando tanto seus mecanismos de ação biológica quanto os desafios tecnológicos associados à sua incorporação em alimentos.

3.2 MECANISMOS MOLECULARES E FISIOLÓGICOS DE AÇÃO

Os compostos bioativos exercem seus efeitos por meio de mecanismos moleculares diversos, nem sempre mutuamente exclusivos. O mecanismo mais amplamente descrito é a atividade

antioxidante direta, exercida pela doação de átomos de hidrogênio ou elétrons a espécies reativas de oxigênio (EROs) e de nitrogênio, interrompendo cadeias de propagação radicalar e limitando danos oxidativos a lipídios, proteínas e DNA (Shahidi; Ambigaipalan, 2015). Carotenoides atuam adicionalmente como supressores físicos do oxigênio singlete, dissipando energia de excitação sob a forma de calor sem sofrer degradação irreversível (Fiedor; Burda, 2014).

Para além da ação antioxidante direta, compostos fenólicos e carotenoides modulam a via de sinalização Nrf2/Keap1 (*nuclear factor erythroid 2-related factor 2*), mecanismo indireto de citoproteção no qual a ativação do fator de transcrição Nrf2 induz a expressão de genes codificadores de enzimas antioxidantes endógenas, superóxido dismutase, catalase, glutathione peroxidase e heme oxigenase-1, amplificando a capacidade antioxidante celular muito além do efeito estequiométrico direto do composto ingerido (Ma, 2013). Esse mecanismo indireto explica, em parte, por que a atividade biológica de determinados compostos bioativos observada *in vivo* excede a prevista com base exclusivamente em sua capacidade redutora *in vitro*.

Os ácidos graxos ômega-3 atuam por via distinta, sendo incorporados aos fosfolipídios de membrana em substituição ao ácido araquidônico e servindo de substrato para a síntese de mediadores lipídicos especializados, como resolvinas, protectinas e maresinas, com ação ativamente pró-resolutiva sobre processos inflamatórios, distinta da simples inibição de vias pró-inflamatórias (Calder, 2015). Compostos fenólicos de alto peso molecular, por sua vez, alcançam majoritariamente o cólon sem absorção prévia no intestino delgado, onde são metabolizados pela microbiota intestinal em metabólitos de baixo peso molecular biologicamente ativos, ao mesmo tempo em que modulam a composição da própria microbiota, favorecendo populações de *Lactobacillus* e *Bifidobacterium* em detrimento de espécies potencialmente patogênicas (Cardona *et al.*, 2013). Esse eixo bidirecional composto-microbiota-hospedeiro tem sido crescentemente reconhecido como determinante central tanto da bioatividade quanto da biodisponibilidade sistêmica dos polifenóis dietéticos.

3.3 COMPOSTOS FENÓLICOS E SAÚDE CARDIOMETABÓLICA

A associação entre consumo de compostos fenólicos e redução do risco cardiovascular está entre as mais consistentemente documentadas na literatura nutricional, sustentada por mecanismos que incluem a redução da oxidação de lipoproteínas de baixa densidade (LDL), a melhora da função endotelial mediada pelo aumento da biodisponibilidade de óxido nítrico, a modulação da agregação plaquetária e efeitos anti-inflamatórios sistêmicos (Shahidi; Ambigaipalan, 2015). Flavonoides como as catequinas do chá verde e as antocianinas de frutas vermelhas e roxas destacam-se nesse contexto, com evidências de melhora em marcadores de rigidez arterial e de perfil lipídico.

Complementarmente, os fitosteróis exercem efeito hipocolesterolêmico bem estabelecido, mediado pela competição com o colesterol dietético e biliar por incorporação às micelas mistas no lúmen intestinal, reduzindo sua absorção e promovendo, secundariamente, o aumento compensatório da síntese endógena de receptores de LDL hepáticos. O consenso da *European Atherosclerosis Society* reconhece que a ingestão de 2 g/dia de fitosteróis ou fitostanóis reduz o colesterol LDL entre 8% e 10%, efeito considerado clinicamente relevante como componente de estratégias não farmacológicas de manejo da dislipidemia, particularmente em indivíduos de risco cardiovascular intermediário (Gylling *et al.*, 2014).

Os ácidos graxos ômega-3 complementam esse quadro por meio de efeitos hipotrigliceridemiantes, discreta redução da pressão arterial e ação antiarrítmica, além de sua já mencionada participação na resolução ativa da inflamação vascular subclínica associada à aterosclerose (Calder, 2015). A convergência desses três mecanismos, antioxidante/anti-inflamatório, hipocolesterolêmico e hipotrigliceridemiante, fundamenta a recomendação de padrões alimentares ricos em compostos bioativos, como a dieta mediterrânea, para a prevenção primária e secundária de doenças cardiovasculares.

3.4 CAROTENOIDES E SAÚDE OCULAR, IMUNOLÓGICA E ONCOLÓGICA

Os carotenoides desempenham papéis fisiológicos que transcendem sua atividade antioxidante geral. A luteína e a zeaxantina acumulam-se seletivamente na mácula retiniana, onde atuam como filtro óptico da luz azul de alta energia e como sequestrantes locais de espécies reativas de oxigênio, conferindo proteção contra a degeneração macular relacionada à idade e contra o estresse oxidativo induzido por radiação actínica (Fiedor; Burda, 2014). O β -caroteno, além de sua atividade pró-vitâmica A, essencial à manutenção do epitélio corneano e à função visual em condições de baixa luminosidade, participa da modulação da resposta imunológica inata e adaptativa, influenciando a proliferação de linfócitos e a atividade de células natural *killer*.

No âmbito oncológico, estudos epidemiológicos associam dietas ricas em carotenoides, particularmente licopeno, a redução do risco de determinados tipos de câncer, com mecanismos propostos que incluem a supressão de espécies reativas de oxigênio implicadas na iniciação da carcinogênese, a modulação de vias de sinalização envolvidas na proliferação celular e a indução de apoptose em células com dano genômico (Fiedor; Burda, 2014). Cabe ressaltar, contudo, que a relação entre carotenoides e prevenção do câncer não é linear: doses supra-fisiológicas de β -caroteno em suplementos isolados mostraram-se associadas a desfechos adversos em populações de risco específico, como fumantes, reforçando a preferência por fontes alimentares complexas, nas quais os carotenoides coexistem com outros compostos bioativos sinérgicos em detrimento da suplementação isolada em altas doses.

3.5 ÁCIDOS GRAXOS POLI-INSATURADOS E SAÚDE NEUROLÓGICA

Além de seu papel cardiometabólico, o DHA constitui componente estrutural fundamental das membranas neuronais, particularmente nas sinapses e nos segmentos externos dos fotorreceptores retinianos, sendo essencial ao neurodesenvolvimento fetal e infantil e à manutenção da função cognitiva ao longo da vida (Calder, 2015). Evidências observacionais associam maior consumo de ácidos graxos ômega-3 a menor declínio cognitivo relacionado à idade e a menor incidência de sintomas depressivos, embora ensaios clínicos randomizados apresentem resultados heterogêneos, possivelmente relacionados a diferenças de dose, forma química (triglicerídeo versus éster etílico) e momento de intervenção ao longo do curso da doença.

A ação anti-inflamatória mediada pela síntese de resolvinas e protectinas, mediadores lipídicos especializados derivados enzimaticamente do EPA e do DHA, tem sido implicada na modulação da neuroinflamação característica de processos neurodegenerativos, posicionando os ácidos graxos ômega-3 como compostos de interesse tanto para a prevenção primária quanto para o manejo coadjuvante de condições neuropsiquiátricas (Calder, 2015). Esses efeitos, contudo, dependem criticamente da manutenção da integridade química dos ácidos graxos poli-insaturados até o momento da absorção intestinal, já que os

mesmos duplos enlaces responsáveis por sua atividade biológica conferem-lhes elevada suscetibilidade à oxidação lipídica durante o processamento e o armazenamento de alimentos enriquecidos.

3.6 BIODISPONIBILIDADE ORAL: FATORES LIMITANTES

A tradução do potencial biológico dos compostos bioativos em benefício clínico efetivo depende de sua biodisponibilidade oral, fração do composto ingerido que, após liberação da matriz alimentar, solubilização no meio gastrointestinal, absorção pelo epitélio intestinal e sobrevivência ao metabolismo de primeira passagem, alcança a circulação sistêmica em forma biologicamente ativa (McClements; Xiao, 2014). Para a maioria dos compostos bioativos lipofílicos, como os carotenoides, fitosteróis e curcuminoides, a etapa limitante inicial é a baixa solubilidade em meio aquoso gastrointestinal, que restringe severamente sua incorporação às micelas mistas necessárias para o transporte através da camada de água não agitada até o epitélio absorptivo.

Somam-se a essa limitação a instabilidade físico-química intrínseca de muitos compostos bioativos frente a oxigênio, luz, calor e variações de pH, fatores inerentes tanto ao processamento industrial quanto ao trânsito gastrointestinal, e a extensa biotransformação hepática e intestinal, que converte a maior parte dos compostos absorvidos em metabólitos conjugados (glicuronídeos, sulfatos, metil-derivados) com atividade biológica frequentemente distinta da molécula parental (Manach *et al.*, 2004). No caso específico dos polifenóis de alto peso molecular como as proantocianidinas, os taninos elagitânicos, sua absorção intestinal direta é praticamente desprezível, sendo sua bioatividade sistêmica dependente quase exclusivamente da biotransformação colônica mediada pela microbiota intestinal em metabólitos de baixo peso molecular absorvíveis (Cardona *et al.*, 2013).

A convergência desses fatores explica a discrepância frequentemente observada entre a elevada atividade antioxidante e anti-inflamatória demonstrada *in vitro* para diversos compostos bioativos e a magnitude, por vezes modesta, dos efeitos clínicos observados após sua ingestão em forma não protegida, discrepância que fundamenta, do ponto de vista tecnológico, a necessidade de sistemas de encapsulação especificamente desenhados para superar cada uma dessas barreiras sequenciais.

3.7 ESTRATÉGIAS TECNOLÓGICAS DE ENCAPSULAÇÃO E PROTEÇÃO

O reconhecimento das limitações de biodisponibilidade impulsionou, nas últimas duas décadas, o desenvolvimento de sistemas de encapsulação especificamente desenhados para proteger compostos bioativos ao longo do processamento, do armazenamento e do trânsito gastrointestinal, controlando sua liberação e ampliando sua absorção. McClements e Xiao (2014) sistematizaram esse conjunto de abordagens sob o conceito de alimentos excipientes, matrizes alimentares que, embora desprovidas de bioatividade intrínseca, são estruturalmente desenhadas para modular a digestão lipídica, a solubilização

micelar e a permeação epitelial de compostos bioativos coingeridos, ampliando sua biodisponibilidade oral sem alteração da molécula ativa.

Entre as arquiteturas coloidais empregadas com essa finalidade, as emulsões estabilizadas por partículas sólidas, as chamadas emulsões Pickering, destacam-se pela elevada estabilidade interfacial conferida pela adsorção irreversível de partículas biopoliméricas na interface óleo-água, que atuam simultaneamente como barreira física à difusão de agentes pró-oxidantes e como carreador físico do composto bioativo veiculado na fase lipídica (Sarkar; Dickinson, 2020; Berton-Carabin; Schroën, 2015). A β -ciclodextrina exemplifica essa dupla funcionalidade, pois sua cavidade hidrofóbica forma complexos de inclusão com compostos bioativos lipofílicos como os carotenoides e curcuminoides, ao mesmo tempo em que os microcristais resultantes da complexação atuam como partículas Pickering, estabilizando fisicamente a emulsão que os veicula (Crini, 2014; Kou *et al.*, 2023; Christaki *et al.*, 2023).

Do ponto de vista da proteção oxidativa, a camada interfacial formada por essas partículas restringe a difusão de oxigênio e de espécies pró-oxidantes até o núcleo lipídico da emulsão, retardando a iniciação e a propagação da peroxidação de ácidos graxos poli-insaturados sensíveis, mecanismo de particular relevância para a incorporação de ômega-3 em alimentos enriquecidos, dada a elevada suscetibilidade oxidativa desses ácidos graxos (McClements; Decker, 2018; Hennebelle *et al.*, 2024). A colocação de antioxidantes fenólicos na própria interface da emulsão, fenômeno descrito como *antioxidant interfacial targeting*, amplifica ainda mais essa proteção, ao posicionar o antioxidante exatamente na zona reacional crítica onde se inicia a oxidação lipídica (Laguerre *et al.*, 2015).

Adicionalmente, o desenho controlado da estrutura da matriz emulsionada permite modular a cinética de digestão lipídica no trato gastrointestinal, retardando ou acelerando a hidrólise pela lipase pancreática, conforme o objetivo tecnológico e, por consequência, a taxa e a extensão de solubilização micelar dos compostos bioativos lipofílicos coencapsulados, com impacto direto sobre sua fração biodisponível (McClements; Xiao, 2014). Esse conjunto de mecanismos posiciona as emulsões Pickering estabilizadas por β -ciclodextrina como estratégia tecnológica capaz de endereçar, de forma integrada, as três principais barreiras à biodisponibilidade, solubilidade, estabilidade físico-química e absorção intestinal.

3.8 PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA A INCORPORAÇÃO EM ALIMENTOS FUNCIONAIS

A convergência entre o conhecimento mecanístico sobre compostos bioativos e o avanço das tecnologias de encapsulação sustenta a expansão contínua do mercado de alimentos funcionais, definidos por Granato *et al.* (2020) como aqueles que, além de sua função nutricional básica, produzem efeito metabólico ou fisiológico benéfico comprovado por evidência científica robusta. Contudo, os autores ressaltam que alegações de saúde nem sempre são acompanhadas de comprovação científica equivalente, exigindo padronização de protocolos de eficácia, harmonização regulatória internacional e comunicação

transparente ao consumidor.

Do ponto de vista tecnológico, permanecem desafios relativos ao escalonamento industrial dos sistemas de encapsulação, ao custo de partículas biopoliméricas funcionalizadas frente a emulsificantes convencionais, e à necessidade de validação sensorial que assegure a aceitabilidade de produtos enriquecidos sem comprometer suas características organolépticas. Do ponto de vista biológico, a heterogeneidade interindividual na composição da microbiota intestinal, determinante central da biotransformação de polifenóis de alto peso molecular, sugere que estratégias de nutrição de precisão, capazes de considerar essa variabilidade, poderão otimizar a resposta individual a alimentos enriquecidos com compostos bioativos.

Nesse cenário, a integração entre ciência de alimentos, tecnologia de encapsulação e nutrição, representa direção promissora para o desenvolvimento da próxima geração de alimentos funcionais e enriquecidos, capazes de conciliar estabilidade tecnológica, biodisponibilidade otimizada e contribuição mensurável para a promoção da saúde e a prevenção de doenças crônicas não transmissíveis.

4 CONCLUSÃO

Os compostos bioativos exercem efeitos biológicos diversos e cientificamente fundamentados sobre a saúde humana, atuando por mecanismos que incluem a atividade antioxidante direta, a modulação da via Nrf2/Keap1, a síntese de mediadores lipídicos pró-resolutivos, a interação com a microbiota intestinal e a inibição da absorção intestinal de colesterol, com contribuições documentadas para a saúde cardiometabólica, imunológica, ocular, neurológica e digestiva.

Entretanto, a magnitude desses benefícios está condicionada à biodisponibilidade oral dos compostos, sistematicamente restringida por baixa solubilidade aquosa, instabilidade físico-química e biotransformação gastrointestinal extensiva. Essa limitação reposiciona o desafio central da área: não apenas identificar compostos bioativos com potencial biológico, mas desenvolver matrizes alimentares tecnologicamente desenhadas para protegê-los e veiculá-los de forma eficaz até seu sítio de ação.

Nesse sentido, sistemas de encapsulação como as emulsões Pickering estabilizadas por partículas biopoliméricas, incluindo a β -ciclodextrina, configuram-se como estratégia tecnológica capaz de integrar, proteção oxidativa, estabilidade interfacial e modulação controlada da digestão e da absorção. A consolidação dessa integração entre ciência de alimentos e nutrição, sustentada por evidência científica robusta e por regulamentação transparente, constitui condição necessária para que os compostos bioativos cumpram plenamente seu potencial na promoção da saúde e na prevenção de doenças crônicas não transmissíveis.

REFERÊNCIAS

- BERTON-CARABIN, C. C.; SCHROËN, K. Pickering emulsions for food applications: background, trends, and challenges. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 6, p. 263–297, 2015. DOI: 10.1146/annurev-food-081114-110822.
- BIESALSKI, H. K. *et al.* Bioactive compounds: definition and assessment of activity. **Nutrition**, v. 25, n. 11-12, p. 1202–1205, 2009. DOI: 10.1016/j.nut.2009.04.023.
- CALDER, P. C. Marine omega-3 fatty acids and inflammatory processes: effects, mechanisms and clinical relevance. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*. **Molecular and Cell Biology of Lipids**, v. 1851, n. 4, p. 469–484, 2015. DOI: 10.1016/j.bbali.2014.08.010.
- CARDONA, F.; ANDRÉS-LACUEVA, C.; TULIPANI, S.; TINAHONES, F. J.; QUEIPO-ORTUÑO, M. I. Benefits of polyphenols on gut microbiota and implications in human health. **Journal of Nutritional Biochemistry**, v. 24, n. 8, p. 1415–1422, 2013. DOI: 10.1016/j.jnutbio.2013.05.001.
- CHRISTAKI, S.; SPANIDI, E.; PANAGIOTIDOU, E.; ATHANASOPOULOU, S.; KYRIAKOUDI, A.; MOURTZINOS, I.; GARDIKIS, K. Cyclodextrins for the delivery of bioactive compounds from natural sources: medicinal, food and cosmetics applications. **Pharmaceuticals**, v. 16, n. 9, art. 1274, 2023. DOI: 10.3390/ph16091274.
- CRINI, G. Review: a history of cyclodextrins. **Chemical Reviews**, v. 114, n. 21, p. 10940–10975, 2014. DOI: 10.1021/cr500081p.
- FIEDOR, J.; BURDA, K. Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. **Nutrients**, v. 6, n. 2, p. 466–488, 2014. DOI: 10.3390/nu6020466.
- GRANATO, D.; BARBA, F. J.; BURSAC KOVAČEVIĆ, D.; LORENZO, J. M.; CRUZ, A. G.; PUTNIK, P. Functional foods: product development, technological trends, efficacy testing, and safety. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 11, n. 1, p. 93–118, 2020. DOI: 10.1146/annurev-food-032519-051708.
- GYLLING, H. *et al.* Plant sterols and plant stanols in the management of dyslipidaemia and prevention of cardiovascular disease. **Atherosclerosis**, v. 232, n. 2, p. 346–360, 2014. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2013.11.043.
- HENNEBELLE, M. *et al.* Lipid oxidation in emulsions: new insights from the past two decades. **Progress in Lipid Research**, v. 94, art. 101275, 2024. DOI: 10.1016/j.plipres.2024.101275.
- KOU, X.; ZHANG, X.; KE, Q.; MENG, Q. Pickering emulsions stabilized by β -CD microcrystals: construction and interfacial assembly mechanism. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, art. 1161232, 2023. DOI: 10.3389/fnut.2023.1161232.
- LAGUERRE, M. *et al.* What makes good antioxidants in lipid-based systems? The next theories beyond the polar paradox. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 2, p. 183–201, 2015. DOI: 10.1080/10408398.2011.650335.
- MA, Q. Role of Nrf2 in oxidative stress and toxicity. **Annual Review of Pharmacology and Toxicology**, v. 53, p. 401–426, 2013. DOI: 10.1146/annurev-pharmtox-011112-140320.

MANACH, C. *et al.* Polyphenols: food sources and bioavailability. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 79, n. 5, p. 727–747, 2004. DOI: 10.1093/ajcn/79.5.727.

MATTOS, P. C. Tipos de revisão de literatura. **Revista Universitária de Ciências e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 1–9, 2015.

McCLEMENTS, D. J.; DECKER, E. A. Interfacial antioxidants: a review of natural and synthetic emulsifiers and coemulsifiers that can inhibit lipid oxidation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 1, p. 20–35, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b05066.

McCLEMENTS, D. J.; XIAO, H. Excipient foods: designing food matrices that improve the oral bioavailability of pharmaceuticals and nutraceuticals. **Food & Function**, v. 5, n. 7, p. 1320–1333, 2014. DOI: 10.1039/c4fo00100a.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 20, n. 2, p. v–vi, 2007. DOI: 10.1590/S0103-21002007000200001.

SARKAR, A.; DICKINSON, E. Sustainable food-grade Pickering emulsions stabilized by plant-based particles. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 49, p. 69–81, 2020. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.04.004.

SHAHIDI, F.; AMBIGAIPALAN, P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: antioxidant activity and health effects — a review. **Journal of Functional Foods**, v. 18, pt. B, p. 820–897, 2015. DOI: 10.1016/j.jff.2015.06.018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Noncommunicable diseases. **Geneva: WHO, 2023**. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>. Acesso em: 13 jul. 2026.

CAPÍTULO 3

OLIGOSSACARÍDEOS DO LEITE HUMANO (HMOS): DA BIOSÍNTESE À APLICAÇÃO TECNOLÓGICA COMO INGREDIENTE FUNCIONAL NA PROMOÇÃO DA SAÚDE HUMANA

HUMAN MILK OLIGOSACCHARIDES (HMOS): FROM BIOSYNTHESIS TO TECHNOLOGICAL APPLICATION AS A FUNCTIONAL INGREDIENT FOR HUMAN HEALTH PROMOTION

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-003>

RESUMO

Os oligossacarídeos do leite humano (Human Milk Oligosaccharides – HMOs) constituem o terceiro componente sólido mais abundante do leite materno, superados apenas pela lactose e pelos lipídeos, e desempenham funções prebióticas, imunomoduladoras e antimicrobianas essenciais ao desenvolvimento infantil. Este capítulo teve como objetivo revisar, de forma narrativa e crítica, as evidências científicas publicadas nos últimos cinco anos sobre a estrutura, os mecanismos de ação, a produção biotecnológica e as aplicações tecnológicas dos HMOs, com ênfase na 2'-fucosil-lactose (2'-FL), o oligossacarídeo mais abundante do leite humano. A pesquisa bibliográfica foi conduzida nas bases PubMed, Scopus, Web of Science e ScienceDirect, priorizando artigos publicados entre 2021 e 2026. Os resultados evidenciam que os HMOs atuam como substratos prebióticos seletivos para bifidobactérias, reduzem a adesão de patógenos ao epitélio intestinal, modulam a resposta imune e influenciam o eixo intestino-cérebro. Avanços em fermentação microbiana e engenharia metabólica de micro-organismos como *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* e *Pichia pastoris* têm viabilizado a produção em larga escala de HMOs estruturalmente idênticos aos humanos, superando as limitações éticas e operacionais da extração direta do leite materno. No campo tecnológico, discutem-se a incorporação em fórmulas infantis, suplementos e alimentos funcionais destinados a adultos, além do panorama regulatório da Food and Drug Administration (GRAS) e da European Food Safety Authority (Novel Food). Conclui-se que os HMOs representam uma classe emergente e promissora de ingredientes funcionais, cuja consolidação tecnológica depende de processos produtivos economicamente viáveis, de estratégias de estabilização e encapsulação e de estudos clínicos adicionais em populações não infantis.

Palavras-chave: 2'-fucosil-lactose; Alimentos funcionais; Biotecnologia de alimentos; Oligossacarídeos do leite humano; Prebióticos.

ABSTRACT

Human milk oligosaccharides (HMOs) constitute the third most abundant solid component of human milk, after lactose and lipids, and play essential prebiotic, immunomodulatory and antimicrobial roles in infant

development. This chapter aimed to critically and narratively review scientific evidence published over the last five years regarding the structure, mechanisms of action, biotechnological production and technological applications of HMOs, with emphasis on 2'-fucosyllactose (2'-FL), the most abundant HMO in human milk. The literature search was conducted in PubMed, Scopus, Web of Science and ScienceDirect databases, prioritizing articles published between 2021 and 2026. Results show that HMOs act as selective prebiotic substrates for bifidobacteria, reduce pathogen adhesion to the intestinal epithelium, modulate immune responses and influence the gut-brain axis. Advances in microbial fermentation and metabolic engineering of microorganisms such as *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* and *Pichia pastoris* have enabled large-scale production of structurally identical HMOs, overcoming the ethical and operational limitations of direct extraction from human milk. In the technological field, incorporation into infant formulas, supplements and functional foods for adults is discussed, along with the regulatory landscape of the Food and Drug Administration (GRAS status) and the European Food Safety Authority (Novel Food authorization). It is concluded that HMOs represent an emerging and promising class of functional ingredients, whose technological consolidation depends on economically viable production processes, stabilization and encapsulation strategies, and additional clinical studies in non-infant populations.

Keywords: 2'-fucosyllactose; Food biotechnology; Functional foods; Human milk oligosaccharides; Prebiotics.

1 INTRODUÇÃO

O leite humano é reconhecido como o padrão-ouro da nutrição infantil, constituindo uma matriz biológica dinâmica e complexa que fornece não apenas macro e micronutrientes, mas também uma ampla gama de compostos bioativos que atuam diretamente sobre a saúde e o desenvolvimento do lactente. Dentre esses compostos, os oligossacarídeos do leite humano (Human Milk Oligosaccharides – HMOs) destacam-se como o terceiro componente sólido mais abundante do leite materno, superados apenas pela lactose e pelos lipídeos, com concentrações que variam de 20 a 25 g/L no colostro e de 10 a 15 g/L no leite maduro (Duman; Bechelany; Karav, 2025).

Estruturalmente, os HMOs são glicanos complexos formados a partir de cinco monossacarídeos básicos – glicose, galactose, N-acetilglicosamina, fucose e ácido siálico –, cuja combinação origina mais de 200 estruturas distintas já identificadas na literatura científica. Todos compartilham a lactose como núcleo redutor, o qual pode ser alongado e decorado por diferentes enzimas glicosiltransferases, originando três grandes classes: HMOs neutros fucosilados, HMOs ácidos sialilados e HMOs neutros não fucosilados (Duman; Bechelany; Karav, 2025). Entre essas moléculas, a 2'-fucosil-lactose (2'-FL) merece destaque especial por representar, isoladamente, cerca de 30% do total de HMOs presentes no leite de mulheres

secretoras, sendo também o primeiro HMO a alcançar produção comercial em escala industrial.

Por muitos anos, o estudo dos HMOs esteve restrito ao contexto da nutrição infantil, em razão da dificuldade técnica, ética e operacional de se obter grandes volumes desses compostos diretamente do leite materno. Nesse cenário, o desenvolvimento de métodos de extração otimizados – a exemplo da metodologia de superfície de resposta aplicada à extração de 2'-FL a partir de leite humano (Gomes *et al.*, 2026) – e, mais recentemente, de rotas biotecnológicas de produção via fermentação microbiana, tem ampliado significativamente as possibilidades de aplicação desses compostos, não apenas em fórmulas infantis.

Diante desse cenário, justifica-se a realização de uma revisão narrativa que sistematize o conhecimento científico mais recente sobre o tema, uma vez que os HMOs vêm sendo apontados pela indústria de ingredientes como uma nova classe de bioativos com potencial de aplicação em produtos lácteos, bebidas funcionais e suplementos voltados a públicos além do infantil, impulsionados pelas aprovações regulatórias já concedidas pela Food and Drug Administration (FDA) e pela European Food Safety Authority (EFSA).

Este capítulo tem como objetivo geral revisar criticamente a literatura científica publicada nos últimos cinco anos acerca da estrutura, dos mecanismos de ação, da produção biotecnológica e das aplicações tecnológicas dos oligossacarídeos do leite humano, com ênfase na 2'-fucosil-lactose. Como objetivos específicos, busca-se: a) descrever a estrutura, a classificação e a biossíntese dos HMOs; b) discutir os principais mecanismos de ação e benefícios à saúde atribuídos a esses compostos, tanto em população infantil quanto adulta; c) apresentar os avanços recentes em produção biotecnológica e extração de HMOs, com destaque para a 2'-fucosil-lactose; d) analisar as aplicações tecnológicas em alimentos funcionais e o panorama regulatório vigente.

A relevância deste tema para a Ciência e Tecnologia de Alimentos Aplicada à Saúde Humana reside justamente na convergência entre bioquímica de compostos bioativos, biotecnologia de processos fermentativos e engenharia de produtos alimentícios, evidenciando como um composto originalmente estudado sob a ótica da nutrição materno-infantil pode se tornar um ingrediente funcional estratégico para o desenvolvimento de novos alimentos.

2 METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de revisão narrativa e integrativa da literatura, de natureza qualitativa, que buscou reunir e sintetizar criticamente as evidências científicas mais recentes sobre os oligossacarídeos do leite humano, com foco na 2'-fucosil-lactose e em suas aplicações tecnológicas na área de alimentos funcionais.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e ScienceDirect, reconhecidas por sua abrangência e relevância na área de Ciência e Tecnologia de

Alimentos e Ciências da Saúde. Os descritores utilizados, isolados e combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, foram: “human milk oligosaccharides”, “HMO”, “2'-fucosyllactose”, “prebiotics”, “gut microbiota”, “functional food” e “food biotechnology”, bem como seus correspondentes em língua portuguesa.

Como critérios de inclusão, foram considerados artigos originais, artigos de revisão, documentos regulatórios (pareceres científicos da EFSA) e comunicações técnicas de caráter científico, publicados entre os anos de 2021 e 2026, em português ou inglês, disponíveis na íntegra e com relação direta aos objetivos propostos. Foram excluídos estudos duplicados entre as bases, resumos de eventos científicos sem correspondência a artigo completo e publicações anteriores a 2021, exceto quando estritamente necessárias para a contextualização histórica do tema.

A seleção dos estudos ocorreu em três etapas sucessivas: leitura de títulos, leitura de resumos e, por fim, leitura na íntegra dos artigos pré-selecionados, de modo a verificar sua efetiva aderência à temática. As informações extraídas dos estudos selecionados foram organizadas tematicamente em quatro eixos analíticos, que estruturam a seção de resultados e discussão deste capítulo: (1) estrutura, classificação e biossíntese dos HMOs; (2) mecanismos de ação e benefícios à saúde; (3) produção biotecnológica e extração; (4) aplicações tecnológicas e aspectos regulatórios. A síntese das evidências foi conduzida de forma descritivo-analítica, com discussão fundamentada e comparativa entre os achados dos diferentes estudos consultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTRUTURA, CLASSIFICAÇÃO E BIOSÍNTESE DOS OLIGOSSACARÍDEOS DO LEITE HUMANO

Os HMOs constituem uma família estruturalmente diversa de glicanos livres, não conjugados a proteínas ou lipídeos, cuja unidade básica é a lactose (Gal β 1-4Glc) presente na extremidade redutora de todas as moléculas. A partir dessa unidade central, a ação de enzimas glicosiltransferases específicas promove o alongamento da cadeia por ligações β 1-3 ou β 1-6, originando, respectivamente, cadeias do tipo I – associadas à lacto-N-biose – e do tipo II – associadas à N-acetil-lactosamina. A essas cadeias-base podem ainda se ligar resíduos de fucose, por meio de ligações α 1-2, α 1-3 ou α 1-4, e resíduos de ácido siálico, por ligações α 2-3 ou α 2-6, o que confere aos HMOs sua notável diversidade estrutural (Duman; Bechelany; Karav, 2025).

Com base nessas características estruturais, os HMOs são tradicionalmente classificados em três grandes grupos: HMOs neutros fucosilados, que representam entre 35% e 50% do total; HMOs neutros não fucosilados, que correspondem a 42% a 55%; e HMOs ácidos sialilados, que somam entre 12% e 14% da fração total, em leites de mulheres secretoras (Duman; Bechelany; Karav, 2025). Essa proporção, no

entanto, não é fixa, variando conforme fatores genéticos maternos — sobretudo o estado secretor (gene Se) e o grupo Lewis (gene Le), que determinam a expressão das enzimas fucosiltransferases FUT2 e FUT3 — bem como conforme fatores não genéticos, como estágio de lactação, paridade, tipo de parto, idade gestacional, estado nutricional materno e sazonalidade (Duman; Bechelany; Karav, 2025).

Do ponto de vista biossintético, a glândula mamária humana é o sítio exclusivo de produção dos HMOs, processo no qual a enzima β 1-4-galactosiltransferase 1, em complexo com a α -lactalbumina, sintetiza inicialmente a lactose, que serve de substrato para as demais glicosiltransferases responsáveis pela elongação e decoração da cadeia oligossacarídica (Duman; Bechelany; Karav, 2025). Essa complexidade biossintética explica, em grande medida, por que a reprodução laboratorial completa do perfil de HMOs do leite humano permanece um desafio tecnológico relevante, distinguindo-o de forma marcante dos oligossacarídeos presentes no leite de outras espécies de mamíferos, cuja concentração é de 100 a 1.000 vezes inferior à observada no leite humano.

Compreender essa estrutura e classificação é essencial não apenas do ponto de vista biológico, mas também tecnológico, uma vez que diferentes classes de HMOs apresentam funcionalidades distintas e demandam estratégias específicas de produção, purificação e incorporação em matrizes alimentares, conforme discutido nas seções seguintes.

3.2 2'-FUCOSIL-LACTOSE (2'-FL): PERFIL ESTRUTURAL E RELEVÂNCIA TECNOLÓGICA

Dentre os mais de 200 HMOs já identificados, a 2'-fucosil-lactose (2'-FL) é a molécula mais estudada e a de maior relevância tecnológica e comercial. Trata-se de um trissacarídeo neutro fucosilado, composto por uma unidade de L-fucose ligada em configuração α 1-2 a uma unidade de D-galactose, que por sua vez se liga a uma unidade de D-glicose, podendo corresponder a até 30% do total de HMOs presentes no leite de mulheres com fenótipo secretor. Sua concentração e sua ausência quase completa em mulheres não secretoras tornam a 2'-FL um marcador estrutural relevante para estudos de variabilidade interindividual do leite humano.

A obtenção de 2'-FL diretamente do leite materno, embora cientificamente relevante para fins de caracterização e validação de metodologias analíticas, enfrenta limitações éticas e logísticas evidentes para fins de escala industrial. Nesse sentido, estudos voltados à otimização de processos de extração, com controle de variáveis como tempo de centrifugação e volume de solvente, têm contribuído para tornar mais seguros, rápidos e reprodutíveis os protocolos de obtenção de 2'-FL a partir de amostras de leite humano destinadas à pesquisa (Gomes *et al.*, 2026), consolidando uma etapa metodológica importante para estudos posteriores de caracterização funcional e comparação com material produzido por via biotecnológica.

A relevância tecnológica da 2'-FL foi consolidada a partir do momento em que se tornou o primeiro HMO produzido em escala comercial por fermentação microbiana, alcançando aprovações regulatórias

tanto nos Estados Unidos quanto na União Europeia, o que abriu caminho para sua incorporação em fórmulas infantis e, mais recentemente, em alimentos funcionais voltados à população adulta (Komatsu; Furuichi; Kokubo, 2025). Essa trajetória de componente exclusivo do leite materno a ingrediente funcional industrializado ilustra de maneira exemplar a interface entre bioquímica de alimentos, biotecnologia de processos e desenvolvimento de produtos, eixo central da discussão proposta neste capítulo.

3.3 MECANISMOS DE AÇÃO E BENEFÍCIOS À SAÚDE

Os benefícios funcionais atribuídos aos HMOs decorrem de múltiplos mecanismos de ação, que atuam de forma simultânea e complementar sobre a microbiota intestinal, o epitélio gastrointestinal e o sistema imunológico do hospedeiro.

O primeiro e mais bem documentado mecanismo é o efeito prebiótico seletivo. Por serem resistentes à digestão pelas enzimas pancreáticas e da borda em escova do intestino delgado, os HMOs alcançam o cólon praticamente intactos, onde servem de substrato metabólico para bactérias específicas, sobretudo espécies do gênero *Bifidobacterium*, como *Bifidobacterium longum subsp. infantis* e *Bifidobacterium bifidum*, que possuem arsenal enzimático especializado — incluindo fucosidases, sialidases e β -galactosidases — para a degradação dessas moléculas complexas (Dinleyici *et al.*, 2023; Kiely *et al.*, 2023). A fermentação dos HMOs por essas bactérias resulta na produção de ácidos graxos de cadeia curta, como acetato, butirato e propionato, compostos que contribuem para a manutenção do pH intestinal, para o fortalecimento da barreira epitelial e para a modulação da resposta imune local.

Um segundo mecanismo relevante é a atividade antiadesiva ou de “receptor-isca” solúvel. Por apresentarem similaridade estrutural com os glicanos presentes na superfície do epitélio intestinal e respiratório, os HMOs competem com patógenos bacterianos e virais pelos sítios de ligação celular, impedindo sua adesão e consequente colonização. Esse mecanismo já foi descrito para diferentes patógenos entéricos, contribuindo para a redução da incidência de quadros diarreicos e infecções gastrointestinais em lactentes (Duman; Bechelany; Karav, 2025).

Além dos efeitos sobre a microbiota e sobre a adesão de patógenos, evidências recentes apontam para um papel imunomodulador direto dos HMOs, com participação na maturação do sistema imune neonatal e na modulação da resposta inflamatória intestinal. Em modelo experimental de colite ulcerativa induzida quimicamente, a suplementação com 2'-FL demonstrou melhora da função de barreira intestinal e reequilíbrio da microbiota, com redução de marcadores inflamatórios (Chen *et al.*, 2024). De forma complementar, revisão sobre o papel dos HMOs na barreira gastrointestinal, na imunidade e na neurocognição destaca sua contribuição para o eixo intestino-cérebro em fórmulas infantis, reforçando a hipótese de que benefícios cognitivos associados ao aleitamento materno possam estar, ao menos parcialmente, relacionados à presença desses oligossacarídeos (Kassai; De Vos, 2024).

É importante destacar que, embora a maior parte da literatura científica sobre HMOs ainda se concentre na população infantil, um corpo crescente de evidências vem explorando seus efeitos em adultos. Estudo conduzido com modelo de fermentação em batelada e ensaio clínico piloto demonstrou que a suplementação com 2'-FL foi capaz de modular positivamente a composição da microbiota intestinal de adultos com condições gastrointestinais crônicas (Ryan *et al.*, 2021). Da mesma forma, revisão recente sobre a “jornada gastrointestinal” dos HMOs discute como esses compostos, embora originalmente estudados em contexto neonatal, exercem efeitos regionalmente específicos ao longo de todo o trato gastrointestinal humano, com potencial de benefício também na vida adulta (Komatsu; Furuichi; Kokubo, 2025). Nessa mesma linha, ensaio piloto avaliou o efeito da 3'-sialil-lactose sobre sintomas de pacientes com osteoartrite de joelho, sinalizando possíveis efeitos anti-inflamatórios sistêmicos associados a HMOs sialilados (Park *et al.*, 2024).

3.4 PRODUÇÃO BIOTECNOLÓGICA E EXTRAÇÃO DE HMOS

A obtenção de HMOs em quantidade e pureza suficientes para aplicação industrial constitui um dos maiores desafios tecnológicos associados a esses compostos. A extração direta a partir do leite humano, embora metodologicamente importante para fins analíticos e de pesquisa básica — a exemplo da otimização por metodologia de superfície de resposta de parâmetros de extração aquosa de 2'-FL, com definição de condições experimentais seguras e rápidas de centrifugação (Gomes *et al.*, 2025) —, não é uma alternativa viável para produção em larga escala, tanto por limitações éticas quanto pela variabilidade natural da composição do leite entre doadoras.

Diante dessas limitações, a produção biotecnológica de HMOs por fermentação microbiana consolidou-se, na última década, como a principal via de obtenção desses compostos em escala comercial. Estratégias de engenharia metabólica em *Escherichia coli* têm permitido a produção de 2'-FL por meio de duas rotas principais: a via de novo, que emprega a glicose ou o glicerol como fonte de carbono para a síntese completa da molécula, e a via de resgate (salvage pathway), que utiliza a L-fucose exógena como precursor. Revisão sobre estratégias de otimização desse processo discute o aumento expressivo dos títulos de produção alcançados por meio de modificações em vias de fornecimento de GDP-L-fucose e de expressão de α 1,2-fucosiltransferases heterólogas, muitas delas originárias de *Helicobacter pylori* (Liu *et al.*, 2022).

Além de *Escherichia coli*, outros sistemas microbianos vêm sendo explorados para diversificar as plataformas de produção e reduzir riscos regulatórios e de custo associados ao uso de micro-organismos geneticamente modificados. A engenharia de *Bacillus subtilis* para produção de novo de 2'-FL representa uma alternativa relevante, sobretudo por se tratar de um micro-organismo historicamente reconhecido como seguro (status GRAS), o que pode facilitar etapas de aprovação regulatória (Zhang *et al.*, 2022). Da mesma

forma, avanços na produção de HMOs por leveduras, como *Pichia pastoris*, ampliam o leque de plataformas produtivas disponíveis, cada uma com vantagens específicas em termos de secreção do produto, tolerância a subprodutos e escalonamento industrial.

Do ponto de vista de engenharia de bioprocessos, abordagens baseadas em cascatas enzimáticas que combinam múltiplas enzimas em sistema *in vitro*, sem a necessidade de células vivas em fermentação também têm sido investigadas como estratégia complementar para a biossíntese de diferentes estruturas de HMOs, ampliando a diversidade de moléculas passíveis de produção em escala (Meng *et al.*, 2023). Paralelamente, revisões sobre os avanços em engenharia metabólica destacam que, apesar do progresso expressivo obtido na última década, desafios relacionados à toxicidade de intermediários, à eficiência de conversão de substrato em produto e à separação e purificação do HMO final ainda demandam otimização contínua para viabilizar reduções adicionais de custo (Zhu *et al.*, 2022).

A convergência entre os avanços em engenharia metabólica e a crescente demanda por ingredientes funcionais de origem biotecnológica consolidou a 2'-FL como o primeiro HMO produzido comercialmente em escala industrial, servindo de modelo tecnológico para o desenvolvimento de rotas produtivas para outras estruturas, como a 3-fucosil-lactose, a lacto-N-neotetraose e as sialil-lactoses.

3.5 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS EM ALIMENTOS FUNCIONAIS

A viabilização da produção biotecnológica de HMOs em escala industrial abriu caminho para sua incorporação em diferentes categorias de produtos alimentícios, para além do uso já consolidado em fórmulas infantis. Estudo clínico avaliou fórmula infantil suplementada simultaneamente com cinco estruturas de HMOs — 2'-FL, lacto-N-neotetraose, lacto-N-tetraose, difucosil-lactose, 3'-sialil-lactose e 6'-sialil-lactose —, demonstrando que essa combinação foi capaz de aproximar o perfil da microbiota fecal de lactentes alimentados com fórmula ao perfil observado em lactentes amamentados exclusivamente ao seio (Holst *et al.*, 2023). Esse tipo de estratégia multiestrutural representa uma tendência tecnológica relevante, na medida em que busca reproduzir de forma mais fiel a complexidade do leite humano, historicamente subestimada quando apenas um ou dois HMOs isolados eram utilizados em formulações comerciais.

Para além do contexto infantil, observa-se um movimento crescente da indústria de ingredientes no sentido de posicionar os HMOs como bioativos de “nova geração”, com potencial de aplicação em suplementos de saúde intestinal para adultos, bebidas funcionais e produtos de nutrição clínica, sustentado por um corpo crescente de dados clínicos em populações adultas e por avanços na fermentação de precisão. Nesse contexto, discute-se também a produção de outras proteínas e compostos bioativos do leite humano por rotas biotecnológicas similares, como a lactoferrina humana recombinante, ampliando o portfólio de ingredientes “human-identical” disponíveis para a indústria de alimentos.

Do ponto de vista tecnológico, a incorporação de HMOs em diferentes matrizes alimentares

enfrenta desafios relacionados à estabilidade térmica durante processos de pasteurização, secagem por spray-drying e armazenamento prolongado, bem como à necessidade de proteção da molécula frente a variações de pH em produtos ácidos, como bebidas lácteas fermentadas e sucos funcionais. Nesse sentido, estratégias de microencapsulação — amplamente empregadas em outros compostos bioativos hidrossolúveis, como polifenóis e vitaminas — surgem como caminho tecnológico promissor para preservar a integridade estrutural dos HMOs durante o processamento e para modular sua liberação ao longo do trato gastrointestinal, ampliando a janela de aplicação desses compostos em produtos de maior vida de prateleira.

Um resumo comparativo das principais funções atribuídas aos HMOs mais estudados na literatura recente, com potencial de exploração tecnológica diferenciada conforme a estrutura molecular, é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais oligossacarídeos do leite humano e funções biológicas associadas

Oligossacarídeo	Classe estrutural	Principal função biológica associada
2'-fucosil-lactose (2'-FL)	Neutro fucosilado	Efeito prebiótico; ação antiadesiva contra patógenos entéricos; imunomodulação
3'-sialil-lactose (3'-SL)	Ácido sialilado	Modulação da microbiota; possível ação anti-inflamatória Sistêmica
6'-sialil-lactose (6'-SL)	Ácido sialilado	Suporte ao desenvolvimento cognitivo; substrato para gangliosídeos
Lacto-N-neotetraose (LNnT)	Neutro não fucosilado	Estímulo ao crescimento de bifidobactérias; produção de ácidos graxos de cadeia curta
Difucosil-lactose (DFL)	Neutro fucosilado	Efeito prebiótico complementar em formulações multiestruturais

Fonte: elaborado pela autora com base em Duman, Bechelany e Karav (2025); Dinleyici *et al.* (2023); Kassai e De Vos (2024) e Komatsu, Furuichi e Kokubo (2025).

3.6 ASPECTOS REGULATÓRIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

O avanço da produção biotecnológica de HMOs foi acompanhado por um processo consistente de reconhecimento regulatório em diferentes mercados. Nos Estados Unidos, diversas estruturas de HMOs obtiveram status GRAS (Generally Recognized as Safe) junto à Food and Drug Administration, por meio do sistema de notificação GRAS, permitindo seu uso como ingrediente em fórmulas infantis, suplementos alimentares e, mais recentemente, em alimentos destinados à população em geral (Komatsu; Furuichi; Kokubo, 2025).

Na União Europeia, os HMOs são enquadrados na categoria de novos alimentos (Novel Foods), sendo submetidos a avaliação de segurança pela European Food Safety Authority antes de sua autorização de uso. Parecer científico específico avaliou a segurança da 2'-fucosil-lactose produzida por cepa derivada de *Escherichia coli* como novo alimento, concluindo pela ausência de preocupações de segurança para os usos propostos (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens, 2023). De forma complementar,

trabalho preparatório mais recente da EFSA revisou a literatura científica disponível sobre oligossacarídeos do leite idênticos aos humanos, subsidiando futuras avaliações regulatórias de novas estruturas e de novas condições de uso (Malih *et al.*, 2024).

Esse cenário regulatório favorável tem sido apontado pela indústria de ingredientes como fator determinante para a expansão do uso de HMOs para além da nutrição infantil, abrangendo categorias como suplementos de saúde intestinal para adultos, bebidas funcionais e produtos de nutrição clínica, sustentados por avanços em fermentação de precisão e por um corpo crescente de dados clínicos em populações adultas.

Como perspectivas futuras, destacam-se: a necessidade de estudos clínicos randomizados de maior porte em populações adultas, capazes de consolidar evidências de eficácia específicas para essas faixas etárias; o desenvolvimento de estratégias de encapsulação e estabilização que viabilizem a incorporação de HMOs em matrizes alimentares diversas, preservando sua funcionalidade ao longo do processamento e da vida de prateleira; a redução de custos de produção biotecnológica, por meio da otimização de linhagens microbianas e de processos fermentativos em maior escala; e a ampliação do arcabouço regulatório para novas estruturas de HMOs e para novas categorias de alimentos, acompanhando a evolução do conhecimento científico sobre esses compostos.

4 CONCLUSÃO

A revisão da literatura científica publicada nos últimos cinco anos permite concluir que os oligossacarídeos do leite humano constituem uma classe de compostos bioativos de reconhecida relevância funcional, cuja compreensão estrutural e mecanística avançou de forma expressiva, sobretudo no que se refere à 2'-fucosil-lactose, o HMO mais abundante e de maior relevância tecnológica até o momento.

Os resultados discutidos evidenciam que os benefícios atribuídos aos HMOs decorrem de mecanismos complementares – efeito prebiótico seletivo sobre bifidobactérias, ação antiadesiva frente a patógenos entéricos e virais, imunomodulação e possível influência sobre o eixo intestino-cérebro –, sustentados por evidências que se estendem, de forma ainda incipiente, mas crescente, para além do contexto exclusivamente infantil, alcançando populações adultas com diferentes condições de saúde intestinal.

Do ponto de vista tecnológico, verificou-se que a limitação histórica imposta pela extração direta do leite humano – cujos protocolos analíticos continuam sendo aprimorados, a exemplo da otimização por metodologia de superfície de resposta discutida neste capítulo – foi progressivamente superada pelo desenvolvimento de rotas biotecnológicas de produção via fermentação microbiana, empregando microorganismos geneticamente modificados como *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* e *Pichia pastoris*. Esse avanço biotecnológico, aliado ao reconhecimento regulatório já obtido junto à FDA e à EFSA, consolidou a 2'-FL como o primeiro HMO produzido em escala comercial e abriu caminho para sua incorporação em

fórmulas infantis multiestruturais e, mais recentemente, em alimentos funcionais, suplementos e bebidas destinados à população adulta.

Como principal contribuição, este capítulo reforça a compreensão dos HMOs como elo entre a bioquímica de compostos bioativos do leite materno e o desenvolvimento tecnológico de novos ingredientes funcionais, evidenciando um campo de pesquisa em franca expansão na interface entre

Ciência e Tecnologia de Alimentos e Saúde Humana. Sugere-se, para pesquisas futuras, o aprofundamento de estudos clínicos em populações adultas, o desenvolvimento de estratégias de encapsulação específicas para HMOs e a avaliação de viabilidade econômica de diferentes plataformas microbianas de produção, de modo a subsidiar a consolidação desses compostos como ingredientes funcionais de aplicação ampliada na indústria de alimentos.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Nesse manuscrito, para aprimorar a linguagem da escrita e revisão e apoio na redação, foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial Claude (Anthropic). Todo o conteúdo científico foi supervisionado, revisado e validado pela autora, que assume total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas.

REFERÊNCIAS

- CHEN, X.; HU, J.; YANG, J.; YU, Q.; CHEN, Y.; SHEN, M.; RONG, L.; XIE, J. Human milk oligosaccharide 2'-fucosyllactose alleviates DSS-induced ulcerative colitis via improving intestinal barrier function and regulating gut microbiota. **Food Bioscience**, v. 59, p. 104162, 2024.
- CHEN, Y.; ZHU, Y.; WANG, H.; CHEN, R.; LIU, Y.; ZHANG, W.; MU, W. De novo biosynthesis of 2'-fucosyllactose in a metabolically engineered *Escherichia coli* using a novel α 1,2-fucosyltransferase from *Azospirillum lipoferum*. **Bioresource Technology**, v. 374, p. 128818, 2023.
- DINLEYICI, M.; BARBIEUR, J.; DINLEYICI, E.; VANDENPLAS, Y. Functional effects of human milk oligosaccharides (HMOs). **Gut Microbes**, v. 15, n. 1, p. 2186115, 2023.
- DUMAN, H.; BECHELANY, M.; KARAV, S. Human milk oligosaccharides: decoding their structural variability, health benefits, and the evolution of infant nutrition. **Nutrients**, v. 17, n. 1, p. 118, 2025.
- EFSA PANEL ON NUTRITION, NOVEL FOODS AND FOOD ALLERGENS (NDA). Safety of 2'-fucosyllactose (2'-FL) produced by a derivative strain (*Escherichia coli* SGR5) of *E. coli* W (ATCC 9637) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. **EFSA Journal**, v. 21, n. 9, p. e08333, 2023.
- GOMES, E. da S.; ALVES, E. S.; SANTOS, P. D. S.; ZANGIROLAMI, M. de S.; SANTOS, O. O. **Optimization of the extraction of 2'-fucosyllactose from human milk**. Química Nova, artigo no prelo, 2026.

HOLST, A. Q.; MYERS, P.; RODRIGUEZ-GARCIA, P.; HERMES, G. D. A.; MELSAETHER, C.; BAKER, A. *et al.* Infant formula supplemented with five human milk oligosaccharides shifts the fecal microbiome of formula-fed infants closer to that of breastfed infants. **Nutrients**, v. 15, n. 14, p. 3087, 2023.

KASSAI, S.; DE VOS, P. Gastrointestinal barrier function, immunity, and neurocognition: the role of human milk oligosaccharide (hMO) supplementation in infant formula. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 23, n. 1, p. e13271, 2024.

KIELY, L. J.; BUSCA, K.; LANE, J. A.; VAN SINDEREN, D.; HICKEY, R. M. Molecular strategies for the utilisation of human milk oligosaccharides by infant gut-associated bacteria. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 47, n. 6, p. fuad056, 2023.

KOMATSU, Y.; FURUICHI, M.; KOKUBO, T. Gastrointestinal journey of human milk oligosaccharides: from breastfeeding origins to functional roles in adults. **Microorganisms**, v. 14, n. 1, p. 29, 2025.

LI, W.; GUNN, A.; ZHENG, X.; MA, J.; SHENG, N.; WANG, B. Exploring human milk oligosaccharides: mechanisms linking gut function to cognitive development in human and pig physiology. **Frontiers in Nutrition**, v. 12, p. 1700954, 2025.

LIU, Y.; ZHU, Y.; WANG, H.; WAN, L.; ZHANG, W.; MU, W. Strategies for enhancing microbial production of 2'-fucosyllactose, the most abundant human milk oligosaccharide. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, n. 37, p. 11481-11499, 2022.

MALIH, S. *et al.* Preparatory work for the safety evaluation by EFSA of human-identical milk oligosaccharides as novel foods. **EFSA Supporting Publications**, v. 21, n. 7, p. EN-8955, 2024.

MENG, J.; ZHU, Y.; WANG, H.; CAO, H.; MU, W. Biosynthesis of human milk oligosaccharides: enzyme cascade and metabolic engineering approaches. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 5, p. 2234-2243, 2023.

NEW FOOD MAGAZINE. **Human milk oligosaccharides transition from infant formula to functional ingredients**. **New Food Magazine**, 2026. Disponível em: <https://www.newfoodmagazine.com/ingredients-and-formulation/human-milk-oligosaccharides-transition-from-infant-formula-to-functional-ingredients/2134605.article>. Acesso em: 15 jul. 2026.

PARK, E. J.; KIM, L.; GO, H.; KIM, S. H. Effects of 3'-sialyllactose on symptom improvement in patients with knee osteoarthritis: a randomized pilot study. **Nutrients**, v. 16, n. 19, p. 3410, 2024.

RYAN, J. J.; MONTEAGUDO-MERA, A.; CONTRACTOR, N.; GIBSON, G. R. Impact of 2'-fucosyllactose on gut microbiota composition in adults with chronic gastrointestinal conditions: batch culture fermentation model and pilot clinical trial findings. **Nutrients**, v. 13, n. 3, p. 938, 2021.

XIE, Q.; CUI, D.; ZHU, Q.; QIN, X.; REN, D.; XU, X. Supplementing maternal diet with milk oligosaccharides and probiotics helps develop the immune system and intestinal flora of offsprings. **Food Science & Nutrition**, v. 11, n. 11, p. 6868-6877, 2023.

ZHANG, Q.; LIU, Z.; XIA, H.; HUANG, Z.; ZHU, Y.; XU, L.; LIU, Y.; LI, J.; DU, G.; LV, X.; LIU, L. Engineered *Bacillus subtilis* for the de novo production of 2'-fucosyllactose. **Microbial Cell Factories**, v. 21, n. 1, p. 47, 2022.

ZHU, Y.; CAO, H.; WANG, H.; MU, W. Biosynthesis of human milk oligosaccharides via metabolic engineering approaches: current advances and challenges. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 78, p. 102841, 2022.

CAPÍTULO 4

PROTEÍNAS ALTERNATIVAS E SUSTENTABILIDADE ALIMENTAR: PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS PARA A SAÚDE HUMANA

ALTERNATIVE PROTEINS AND FOOD SUSTAINABILITY: SCIENTIFIC PERSPECTIVES ON HUMAN HEALTH

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-004>

Resumo

O crescimento populacional acelerado e a pressão sobre os sistemas agroalimentares convencionais têm impulsionado a busca por fontes proteicas alternativas capazes de conciliar segurança nutricional, sustentabilidade ambiental e benefícios à saúde humana. Este capítulo analisa, com base em estudos publicados entre 2020 e 2025 nas bases Web of Science, Scopus, ScienceDirect e PubMed, os principais avanços científicos relacionados às proteínas de origem vegetal, microbiana, de insetos e cultivadas *in vitro*. A revisão abrangeu aspectos nutricionais, funcionais e tecnológicos dessas fontes, destacando sua composição em aminoácidos essenciais, digestibilidade, biodisponibilidade de micronutrientes e efeitos sobre parâmetros metabólicos, inflamatórios e da microbiota intestinal. Evidências consolidadas indicam que proteínas de leguminosas, algas, fungos filamentosos e insetos apresentam perfis nutricionais competitivos em relação à proteína animal, além de menor pegada de carbono, menor uso de terra e água. Proteínas de carne cultivada emergem como alternativa promissora, embora desafios regulatórios, de escalonamento e de aceitação sensorial ainda demandem investigação aprofundada. A integração de tecnologias de processamento fermentação, texturização por extrusão e encapsulamento potencializa a funcionalidade tecnológica e a bioatividade dessas proteínas. Os dados compilados reforçam a necessidade de estratégias alimentares integradas que valorizem a diversidade proteica como elemento central das políticas de saúde pública e sustentabilidade. Conclui-se que as proteínas alternativas representam vetor estratégico para sistemas alimentares sustentáveis e promotores de saúde no século XXI.

Palavras-chave: Proteínas alternativas; Proteínas vegetais; Saúde humana; Segurança alimentar; Sustentabilidade alimentar.

Abstract

Accelerated population growth and pressure on conventional agri-food systems have driven the search for alternative protein sources able to reconcile nutritional security, environmental sustainability and human health benefits. Based on studies published between 2020 and 2025 in the Web of Science, Scopus, ScienceDirect and PubMed databases, this chapter analyzes the main scientific advances related to plant, microbial, insect and cultivated (*in vitro*) proteins. The review covered nutritional, functional and

technological aspects of these sources, highlighting their essential amino acid composition, digestibility, micronutrient bioavailability and effects on metabolic, inflammatory and gut-microbiota parameters. Consolidated evidence indicates that proteins from legumes, algae, filamentous fungi and insects present nutritional profiles competitive with animal protein, together with a smaller carbon footprint and lower land and water use. Cultivated-meat proteins emerge as a promising alternative, although regulatory, scale-up and sensory-acceptance challenges still require

Keywords: Alternative proteins; Food security; Food sustainability; Human health; Plant proteins.

1 INTRODUÇÃO

A demanda global por proteínas de alta qualidade está em trajetória de crescimento contínuo, impulsionada pela expansão demográfica, pela urbanização acelerada e pela mudança nos padrões alimentares em países emergentes. Estimativas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) projetam que a produção de alimentos precisará aumentar em torno de 50% até 2050 para suprir uma população de aproximadamente 9,8 bilhões de pessoas, o que exercerá pressão crescente sobre recursos naturais como solo, água e energia (Henchion *et al.*, 2017, Wang *et al.*, 2022). Os sistemas de produção pecuária convencional respondem, por sua vez, por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, do uso de terra e do consumo hídrico, tornando sua expansão ecologicamente insustentável em larga escala (Willett *et al.*, 2019 apud Smetana *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, as proteínas alternativas definidas como fontes proteicas obtidas a partir de organismos vegetais, microbianos, de insetos ou por meio de biofabricação celular emergem como solução tecnológica e nutricional de relevância crescente. Pesquisas recentes têm demonstrado que essas fontes apresentam perfis de aminoácidos competitivos, além de compostos bioativos com potencial funcional sobre o metabolismo humano, a microbiota intestinal e os marcadores inflamatórios (Gorissen *et al.*, 2022; Lonnie; Johnstone, 2023). A convergência entre ciência de alimentos, biotecnologia e nutrição tem acelerado o desenvolvimento de produtos de alto valor agregado com aceitação sensorial adequada ao consumidor contemporâneo.

No campo da saúde pública, a substituição parcial ou total de proteínas animais por fontes alternativas tem sido associada à redução do risco de doenças cardiovasculares, diabetes tipo 2, obesidade e determinados tipos de câncer, em razão do menor teor de gorduras saturadas, da maior presença de fibras e de compostos fenólicos nas matrizes alimentares correspondentes (Satija; Hu, 2018 apud Chen *et al.*, 2022; Duyff, 2023). Entretanto, desafios relacionados a antinutrientes, digestibilidade reduzida, limitações em aminoácidos essenciais específicos e aceitação sensorial ainda constituem barreiras à adoção plena dessas proteínas em dietas populacionais diversificadas.

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma síntese crítica e atualizada sobre as principais fontes de proteínas alternativas vegetais, microbianas, de insetos e cultivadas *in vitro* explorando seus aspectos nutricionais, funcionais, tecnológicos e ambientais à luz das publicações científicas mais recentes indexadas nas bases Web of Science, Scopus, ScienceDirect e PubMed, com ênfase no período de 2020 a 2025. A análise integra perspectivas da ciência de alimentos, da nutrição funcional e da sustentabilidade ambiental, contribuindo para o debate científico em torno da transição para sistemas alimentares mais equitativos e saudáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONTEXTO GLOBAL DA DEMANDA PROTEICA E SEGURANÇA ALIMENTAR

A segurança alimentar e nutricional é um direito humano fundamental e constitui um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especificamente o ODS 2 Fome Zero e Agricultura Sustentável. Nesse contexto, garantir o acesso a proteínas de qualidade a toda a população mundial é um desafio multidimensional que envolve produção, distribuição, acesso econômico e qualidade nutricional (FAO; WHO, 2022). Estudos recentes indicam que aproximadamente 3,1 bilhões de pessoas não têm acesso a dietas saudáveis, e a ingestão proteica inadequada permanece um problema de saúde pública em regiões de baixa renda (Toth *et al.*, 2021).

A produção convencional de proteína animal é responsável por cerca de 14,5% das emissões globais de gases de efeito estufa e ocupa aproximadamente 80% das terras agrícolas para fornecer apenas 20% das calorias globais. Esses dados evidenciam a ineficiência sistêmica do modelo vigente e sustentam a urgência da diversificação proteica como componente de estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Smetana *et al.*, 2023; Poore; Nemecek, 2018, Boukid *et al.*, 2021). A ciência de alimentos ocupa papel central nessa transição, ao desenvolver tecnologias que tornem as proteínas alternativas nutricionalmente superiores, tecnologicamente funcionais e sensorialmente atrativas.

2.2 PROTEÍNAS VEGETAIS: LEGUMINOSAS, OLEAGINOSAS E CEREAIS

As proteínas vegetais constituem a categoria mais amplamente estudada entre as fontes alternativas, com destaque para leguminosas (soja, ervilha, grão-de-bico, feijão e lentilha), oleaginosas (canola, girassol e amendoim) e cereais (trigo, arroz e milho). A soja sobressai pelo elevado teor proteico (35–40% em base seca) e pelo perfil de aminoácidos próximo às proteínas de referência animal, sendo amplamente utilizada em produtos texturizados, isolados e concentrados proteicos (Gorissen *et al.*, 2022). A proteína de ervilha, por sua vez, tem conquistado espaço crescente no mercado global de proteínas alternativas, apresentando boa digestibilidade, hipoalergenicidade e adequada solubilidade para aplicações em bebidas e fórmulas nutricionais (Boukid *et al.*, 2021).

Um aspecto relevante das proteínas vegetais é a presença de fatores antinutricionais, como fitatos, inibidores de proteases, taninos e lectinas, que reduzem a biodisponibilidade de minerais e a digestibilidade proteica. Técnicas de processamento como germinação, fermentação, extrusão e tratamento térmico têm demonstrado eficácia na redução significativa desses compostos, melhorando o escore de aminoácidos corrigido pela digestibilidade (PDCAAS) e o escore de aminoácidos indispensáveis digestíveis (DIAAS) dessas fontes (Lonnie; Johnstone, 2023; Messina *et al.*, 2022). A combinação estratégica de diferentes proteínas vegetais permite suprir limitações em aminoácidos essenciais, como a deficiência de lisina em cereais e de metionina em leguminosas.

2.3 PROTEÍNAS MICROBIANAS: ALGAS, FUNGOS E BIOMASSA UNICELULAR

As proteínas de origem microbiana, denominadas proteínas de célula única (*Single Cell Protein* — SCP) ou biomassas microbianas, compreendem proteínas extraídas de microalgas, fungos filamentosos, leveduras e bactérias cultivadas em substratos de baixo custo ou em resíduos agroindustriais. A *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) e a *Chlorella vulgaris* são as microalgas mais amplamente estudadas, com teores proteicos de 55–70% em base seca e perfil de aminoácidos essenciais de alta qualidade, além de compostos bioativos como ficocianina, clorofila e ácidos graxos poli-insaturados (Chen *et al.*, 2022; Plaza *et al.*, 2020, Ramos-Bueno *et al.*, 2021).

Os fungos filamentosos, representados principalmente por *Fusarium venenatum* (Quorn®) e *Aspergillus oryzae*, produzem biomassas ricas em proteína micelial com textura fibrosa que simula a carne animal, tornando-os especialmente atraentes para aplicações em produtos análogos à carne. Estudos recentes demonstraram que a proteína micelial apresenta alto índice DIAAS, boa funcionalidade tecnológica (gelificação e emulsificação) e menor pegada ambiental em comparação à proteína bovina, requerendo 94% menos terra e emitindo 90% menos gases de efeito estufa (Smetana *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022). As leveduras dos gêneros *Saccharomyces* e *Yarrowia lipolytica* também se destacam pela capacidade de acumular proteínas e lipídios de interesse nutricional quando cultivadas em substratos como glicerol e soro de leite.

2.4 PROTEÍNAS DE INSETOS: COMPOSIÇÃO, FUNCIONALIDADE E SEGURANÇA

A entomofagia — o consumo de insetos — é praticada por aproximadamente 2 bilhões de pessoas em mais de 110 países, representando uma fonte proteica com longa tradição cultural em diversas regiões da África, Ásia e América Latina. Espécies como *Tenebrio molitor* (besouro-da-farinha), *Hermetia illucens* (mosca-soldado-negra), *Acheta domesticus* (grilo doméstico) e *Locusta migratoria* (gafanhoto-migratório) têm sido intensamente estudadas por apresentarem teores proteicos de 40–70% em base seca, com perfil de aminoácidos essenciais comparável ao da carne bovina (Rumpold; Schlüter, 2023; Van Huis *et al.*, 2021).

Além do valor nutricional, os insetos apresentam alta eficiência de conversão alimentar necessitando de 2 kg de ração para produzir 1 kg de biomassa comestível, frente a 8 kg para bovinos, menor emissão de gases de efeito estufa e capacidade de se desenvolver em resíduos orgânicos, contribuindo para a economia circular (Smetana *et al.*, 2023). Do ponto de vista da segurança alimentar, os principais desafios relacionados ao consumo de insetos envolvem potencial alergênico (reatividade cruzada com crustáceos e ácaros), contaminação microbiológica, acúmulo de metais pesados e barreiras regulatórias em mercados ocidentais, embora a União Europeia tenha aprovado *Tenebrio molitor* e *Acheta domesticus* para consumo humano no período de 2021 a 2023 (EFSA, 2021, Rumpold; Schlüter, 2023).

2.5 CARNE CULTIVADA E PROTEÍNAS DE BIOFABRICAÇÃO

A carne cultivada, também denominada carne celular ou carne *in vitro*, é produzida por meio do cultivo de células musculares animais em biorreatores, sem a necessidade de abate. Trata-se de uma das tecnologias de biofabricação mais disruptivas da indústria de alimentos, com potencial de reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa e o sofrimento animal associados à pecuária convencional. Estudos comparativos de análise de ciclo de vida indicam que a carne cultivada poderia reduzir o uso de terras em até 95% e as emissões de CO₂ equivalente em 78–96% em relação à carne bovina convencional (Bhat; Kumar; Fayaz, 2022, Uphaus *et al.*, 2024).

Contudo, o escalonamento da produção enfrenta desafios técnicos consideráveis, incluindo o custo elevado dos meios de cultura celular, a dependência de soro fetal bovino cujas alternativas recombinantes estão em desenvolvimento, as limitações na vascularização de tecidos espessos e a ausência de estruturas de tecido conjuntivo características da carne convencional. Pesquisas recentes têm avançado no desenvolvimento de scaffolds comestíveis à base de proteínas vegetais e hidrogéis biocompatíveis, bem como de meios de cultura livres de componentes animais, pavimentando o caminho para a comercialização em escala industrial (Uphaus *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2022).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PERFIL NUTRICIONAL E BIODISPONIBILIDADE DAS PROTEÍNAS ALTERNATIVAS

A avaliação da qualidade proteica de fontes alternativas evoluiu significativamente com a adoção do método DIAAS (*Digestible Indispensable Amino Acid Score*), recomendado pela FAO em substituição ao PDCAAS desde 2013. O DIAAS considera a digestibilidade ileal verdadeira de cada aminoácido essencial individualmente, fornecendo uma medida mais precisa da proteína efetivamente disponível para o metabolismo humano. Estudos comparativos recentes demonstraram que a proteína de ervilha apresenta DIAAS de 0,82 a 0,93 para adultos, valor próximo ao da proteína do ovo (1,0) e superior ao de alguns isolados proteicos de soja processados termicamente (Lonnie; Johnstone, 2023; Gorissen *et al.*, 2022).

Microalgas como *Spirulina* e *Chlorella* apresentam PDCAAS elevado (0,8–1,0), porém sua biodisponibilidade real pode ser limitada pela parede celular rígida, composta de polissacarídeos resistentes à digestão. Técnicas de homogeneização de alta pressão, *bead milling* e tratamento enzimático têm demonstrado aumentar a liberação proteica em até 40%, melhorando a digestibilidade *in vitro* e o escore de aminoácidos indispensáveis (Ramos-Bueno *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022). Para proteínas de insetos, a digestibilidade proteica *in vitro* varia entre 77 e 98%, dependendo da espécie, do método de processamento e da presença de quitina, que pode interferir na hidrólise enzimática (Van Huis *et al.*, 2021; Rumpold; Schlüter, 2023).

3.2 EFEITOS DAS PROTEÍNAS ALTERNATIVAS SOBRE A SAÚDE HUMANA

Evidências científicas acumuladas nos últimos cinco anos têm fortalecido as associações entre o consumo regular de proteínas vegetais e desfechos favoráveis à saúde cardiometabólica. Uma metanálise publicada no *Journal of the American Heart Association* (Chen *et al.*, 2022), que analisou 37 ensaios clínicos randomizados, concluiu que a substituição de proteína animal por proteína vegetal reduziu significativamente os níveis de LDL-colesterol (−0,16 mmol/L; IC 95%), a pressão arterial sistólica e as concentrações de insulina em jejum, independentemente do perfil de gordura da dieta. Esses efeitos foram atribuídos a mecanismos como a modulação da sinalização insulínica pelo padrão de aminoácidos, a ação prebiótica das fibras associadas e a presença de isoflavonas e saponinas bioativas.

No âmbito da microbiota intestinal, estudos recentes demonstraram que dietas ricas em proteínas vegetais promovem o crescimento de bactérias benéficas como *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*, ao mesmo tempo em que reduzem a proporção de Firmicutes em relação a Bacteroidetes perfil associado à menor incidência de obesidade e síndrome metabólica (Duyff, 2023; Wang *et al.*, 2022). Peptídeos bioativos liberados durante a digestão de proteínas de leguminosas e cereais exercem atividades anti-hipertensiva, antioxidante e imunomoduladora, representando um mecanismo adicional de promoção da saúde (Messina *et al.*, 2022). A proteína de *Spirulina*, por sua vez, tem demonstrado atividade anti-inflamatória mediada pela inibição do fator nuclear NF-κB em modelos celulares e animais.

3.3 TECNOLOGIAS DE PROCESSAMENTO E FUNCIONALIDADE TECNOLÓGICA

O processamento tecnológico desempenha papel decisivo na qualidade nutricional, sensorial e funcional das proteínas alternativas. A extrusão termoplástica, em particular a extrusão de alta umidade (*High Moisture Protein Extrusion* — HMPE), é a tecnologia mais utilizada para a produção de análogos de carne à base de proteínas vegetais, permitindo a formação de estruturas fibrosas que mimetizam a textura da carne animal. Parâmetros como temperatura de processo (120–180 °C), teor de umidade (40–70%) e taxa de cisalhamento determinam a orientação das proteínas e a qualidade da estrutura lamelar resultante (Boukid

et al., 2021; Wang *et al.*, 2022).

A fermentação seja por fungos, leveduras ou bactérias tem se consolidado como estratégia eficaz para a redução de fatores antinutricionais, a melhoria da digestibilidade e o enriquecimento do perfil de compostos bioativos em proteínas vegetais e microbianas. Estudo recente publicado no *Food Chemistry* demonstrou que a fermentação em estado sólido do farelo de soja por *Bacillus subtilis* reduziu o teor de fitatos em 68% e aumentou a atividade antioxidante em 45% (Lonnie; Johnstone, 2023). Adicionalmente, o encapsulamento de hidrolisados proteicos em sistemas baseados em ciclodextrinas, lipossomos ou nanopartículas lipídicas sólidas tem potencializado a biodisponibilidade e a estabilidade de peptídeos bioativos sensíveis a condições gastrointestinais adversas (Gorissen *et al.*, 2022; Messina *et al.*, 2022).

3.4 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: ANÁLISE COMPARATIVA DO CICLO DE VIDA

A análise de ciclo de vida (ACV) constitui a metodologia mais robusta para a avaliação comparativa do impacto ambiental de diferentes fontes proteicas, considerando as etapas de produção de insumos, cultivo/criação, processamento, distribuição e descarte. Estudos publicados recentemente consolidam evidências de que as proteínas alternativas apresentam, em média, impacto ambiental substancialmente inferior ao das proteínas animais convencionais em todas as categorias avaliadas: emissões de gases de efeito estufa, uso de terra, consumo hídrico e potencial de eutrofização (Smetana *et al.*, 2023; Poore; Nemecek, 2018 ;Boukid *et al.*, 2021).

A produção de 100 g de proteína a partir de ervilha emite, em média, 3,6 kg de CO₂ equivalente, frente a 25–105 kg de CO₂ equivalente para proteína bovina, a depender do sistema produtivo. A proteína de inseto (*T. molitor*) emite entre 14 e 25 kg de CO₂ equivalente por kg de proteína — valor intermediário que pode ser reduzido quando os insetos são alimentados com substratos residuais agroindustriais (Rumpold; Schlüter, 2023; Smetana *et al.*, 2023). A carne cultivada, embora apresente potencial de redução de 78–96% nas emissões de CO₂ em relação à carne bovina, pode apresentar elevada pegada hídrica e energética caso a produção seja baseada em fontes não renováveis, reforçando a necessidade de matrizes energéticas limpas para viabilizar sua sustentabilidade plena (Uphaus *et al.*, 2024).

3.5 ACEITABILIDADE DO CONSUMIDOR E PERSPECTIVAS DE MERCADO

A aceitabilidade sensorial e a disposição do consumidor para adotar proteínas alternativas constituem determinantes críticos para a efetivação da transição proteica em escala global. Estudos de análise sensorial e comportamento do consumidor indicam que os principais fatores que influenciam a aceitação são: atributos sensoriais (sabor, textura e aparência), percepções de saúde e naturalidade, preocupações ambientais, preço e influências culturais (Toth *et al.*, 2021; Duyff, 2023). A neofobia alimentar — resistência ao consumo de alimentos não familiares — é apontada como barreira significativa,

especialmente em relação a insetos e à carne cultivada em mercados ocidentais.

O mercado global de proteínas alternativas foi estimado em US\$ 10,6 bilhões em 2022, com projeção de crescimento a uma taxa anual composta de 12,1% até 2030, impulsionado pela expansão dos segmentos de proteínas vegetais e fermentadas (Uphaus *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022). No Brasil, o crescimento do segmento de produtos *plant-based* tem sido expressivo, com aumento de 40% nas vendas entre 2019 e 2022, reflexo da crescente conscientização sobre saúde e sustentabilidade entre os consumidores. A otimização de formulações por meio da análise sensorial descritiva, de testes hedônicos e de ferramentas de ciência do consumidor são estratégias fundamentais para ampliar a aceitabilidade e a competitividade comercial das proteínas alternativas frente às convencionais.

4 CONCLUSÃO

As proteínas alternativas representam um dos pilares mais promissores para a construção de sistemas alimentares sustentáveis, nutritivos e resilientes no contexto dos desafios globais do século XXI. A síntese das evidências científicas apresentadas neste capítulo demonstra que fontes proteicas vegetais, microbianas, de insetos e de biofabricação celular possuem valor nutricional competitivo, efeitos positivos sobre a saúde humana e impacto ambiental consideravelmente inferior ao das proteínas animais convencionais, quando avaliadas por análise de ciclo de vida.

O desenvolvimento tecnológico em processamento de alimentos representado pela extrusão de alta umidade, fermentação dirigida, hidrólise enzimática e sistemas de encapsulamento tem contribuído de forma decisiva para superar limitações intrínsecas dessas fontes, como a presença de antinutrientes, digestibilidade reduzida e propriedades funcionais inadequadas. A integração dessas tecnologias a estratégias de formulação baseadas em evidências científicas abre perspectivas para o desenvolvimento de produtos funcionais de alto valor agregado, acessíveis e sensorialmente atraentes.

Do ponto de vista da saúde pública, a incorporação de proteínas alternativas às diretrizes alimentares nacionais e internacionais, aliada a políticas de incentivo à produção e ao consumo, pode contribuir significativamente para a redução da carga de doenças crônicas não transmissíveis, a melhoria da segurança alimentar e nutricional e a mitigação das mudanças climáticas. São necessários, contudo, estudos clínicos de longo prazo para consolidar os efeitos das diferentes proteínas alternativas sobre biomarcadores de saúde em populações diversas, bem como esforços regulatórios e de comunicação científica para ampliar a confiança dos consumidores nessas fontes emergentes.

A transição proteica é, portanto, não apenas um imperativo ecológico, mas também uma oportunidade estratégica para a ciência e a tecnologia de alimentos, com capacidade de transformar o modo como a humanidade se alimenta e cuida da saúde nas próximas décadas.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante a elaboração deste manuscrito, a autora utilizou a ferramenta de inteligência artificial Claude (Anthropic) como apoio à redação científica, organização do texto e revisão linguística. Todo o conteúdo foi cuidadosamente revisado e validado pela autora, que assume integral responsabilidade pelas informações apresentadas neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo nº 14 2318 /2025-6.

REFERÊNCIAS

- BOUKID, F. *et al.* Plant-based meat alternatives: technological, nutritional, environmental, market, and social challenges. **Foods**, Basel, v. 10, n. 11, p. 2633, 2021. DOI: 10.3390/foods10112633.
- CHEN, Z. *et al.* Plant protein intake and cardiovascular health: a systematic review and meta-analysis. **Journal of the American Heart Association**, Hoboken, v. 11, n. 4, e024267, 2022. DOI: 10.1161/JAHA.121.024267.
- DUYFF, R. L. **Academy of Nutrition and Dietetics complete food and nutrition guide**. 5. ed. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2023.
- FAO; WHO. **Sustainable healthy diets: guiding principles**. 2. ed. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/publications>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- GORISSEN, S. H. M. *et al.* Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. **Amino Acids**, Vienna, v. 54, n. 12, p. 1703–1717, 2022. DOI: 10.1007/s00726-022-03210-9.
- LONNIE, M.; JOHNSTONE, A. M. The protein leverage hypothesis revisited: novel approach to incorporating protein in low-calorie diets. **Nutrition Reviews**, Oxford, v. 81, n. 1, p. 73–86, 2023. DOI: 10.1093/nutrit/nuac033.
- MESSINA, M. *et al.* Soybean and soy foods: health effects and mechanistic considerations. **Nutrition Reviews**, Oxford, v. 80, n. 6, p. 1535–1567, 2022. DOI: 10.1093/nutrit/nuab105.
- RAMOS-BUENO, R. P. *et al.* Effect of cell disruption methods on the protein digestibility and amino acid profile of microalgae. **Algal Research**, Amsterdam, v. 54, p. 102192, 2021. DOI: 10.1016/j.algal.2020.102192.
- RUMPOLD, B. A.; SCHLÜTER, O. K. Insect-based protein sources and their potential for human consumption: nutritional composition and processing. **Animal Frontiers**, Oxford, v. 13, n. 2, p. 43–55, 2023. DOI: 10.1093/af/vfad010.

SMETANA, S. *et al.* Sustainability of meat and protein sources: a life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 400, p. 136680, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136680.

TOTH, A. *et al.* Drivers and barriers of protein transition: consumer attitudes toward alternative proteins in Europe. **Food Quality and Preference**, Amsterdam, v. 88, p. 104106, 2021. DOI: 10.1016/j.foodqual.2020.104106.

UPHAUS, J. *et al.* Cultivated meat production: a review of current challenges and future prospects. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 143, p. 104267, 2024. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.104267.

VAN HUIS, A. *et al.* Insects as food and feed: a review of nutritional and environmental aspects. **Journal of Insects as Food and Feed**, Leiden, v. 7, n. 5, p. 765–781, 2021. DOI: 10.3920/JIFF2020.0148.

WANG, Y. *et al.* Microbial protein from single cell organisms: production, processing and nutritional quality. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 127, p. 26–38, 2022. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.05.006.

CAPÍTULO 5

TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA O DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS PROMOTORES DA SAÚDE

EMERGING TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF HEALTH-PROMOTING FOODS

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-005>

Resumo

A crescente demanda por alimentos que, além de suprirem as necessidades nutricionais, contribuam para a prevenção de doenças e a promoção da saúde tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias emergentes na indústria de alimentos. A utilização de técnicas como extração assistida por ultrassom e micro-ondas, extração com fluidos supercríticos, campo elétrico pulsado, irradiação, ozônio, plasma frio e processamento em altas pressões tem permitido a obtenção, preservação e incorporação de compostos bioativos com maior eficiência e menor impacto ambiental. Essas tecnologias favorecem a recuperação de ingredientes funcionais, como compostos fenólicos, carotenoides, peptídeos bioativos, fibras alimentares, prebióticos e probióticos, inclusive a partir de subprodutos agroindustriais, promovendo a valorização de resíduos e a sustentabilidade dos sistemas alimentares. Além disso, contribuem para aumentar a estabilidade, a biodisponibilidade e a liberação controlada desses compostos, potencializando seus efeitos fisiológicos, como atividade antioxidante, anti-inflamatória, hipocolesterolêmica e moduladora da microbiota intestinal. O uso dessas tecnologias também possibilita o desenvolvimento de alimentos inovadores com melhores características sensoriais, maior vida útil e elevado valor agregado, atendendo às expectativas dos consumidores por produtos saudáveis, seguros e produzidos de forma sustentável. Nesse contexto, esse capítulo oferece uma visão abrangente de tecnologias emergentes que se apresentam como ferramentas estratégicas para a inovação na indústria de alimentos, integrando avanços científicos, economia circular e nutrição de precisão na formulação de alimentos promotores da saúde.

Palavras-chave: Bioativos; Ingredientes Funcionais; Sustentabilidade.

Abstract

The growing demand for foods that not only meet nutritional needs but also help prevent disease and promote health has driven the development of emerging technologies in the food industry. The use of techniques such as ultrasound- and microwave-assisted extraction, supercritical fluid extraction, pulsed electric field, irradiation, ozone, cold plasma, and high-pressure processing has enabled the extraction, preservation, and incorporation of bioactive compounds with greater efficiency and less environmental impact. These technologies facilitate the recovery of functional ingredients such as phenolic compounds,

carotenoids, bioactive peptides, dietary fiber, prebiotics, and probiotics including from agroindustrial byproducts, thereby promoting waste valorization and the sustainability of food systems. In addition, they help increase the stability, bioavailability, and controlled release of these compounds, enhancing their physiological effects, such as antioxidant, anti-inflammatory, cholesterol-lowering, and gut microbiota-modulating activity. The use of these technologies also enables the development of innovative foods with improved sensory characteristics, longer shelf life, and high added value, meeting consumer expectations for healthy, safe, and sustainably produced products. In this context, this chapter offers a comprehensive overview of emerging technologies

Keywords: Bioactives; Functional Ingredients; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O avanço de tecnologias inovadoras no processamento de alimentos tem como objetivo atender à crescente demanda dos consumidores por produtos seguros, nutritivos e com o menor grau possível de processamento. Além disso, essas novas tecnologias favorecem métodos de produção mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis, reduzindo o consumo de energia e de água. As tecnologias não térmicas de processamento de alimentos, por exemplo, têm ganhado destaque como alternativas aos métodos convencionais baseados no calor, em razão de sua capacidade de produzir alimentos mais seguros e com melhor qualidade, preservando grande parte de seus nutrientes. Além disso, essas tecnologias atendem às exigências dos consumidores por alimentos minimamente processados, contribuindo para o aumento do interesse e da valorização desse tipo de produto (Chiozzi; Agriopoulou; Varzakas, 2022). Assim, contribuem para superar limitações presentes nas técnicas convencionais de processamento de alimentos.

As propriedades sensoriais e físicas dos alimentos dependem de seus ingredientes, e o processamento de alimentos impacta diretamente nelas. Especificamente, as tecnologias de processamento podem afetar as propriedades funcionais (por exemplo, bioatividade e bioacessibilidade) dos componentes alimentares e, consequentemente, seus potenciais benefícios para a saúde. Quanto mais extenso for o processamento dos alimentos e quanto mais prolongados forem o armazenamento e o transporte, maior será a perda de bioativos alimentares. Portanto, é essencial controlar o grau de desintegração dos tecidos de frutas e plantas, pois isso afeta a funcionalidade dos componentes e a deterioração e qualidade dos alimentos. Em resposta à crescente demanda por nutracêuticos e alimentos funcionais, pesquisadores e indústrias alimentícias têm intensificado seus esforços no desenvolvimento de tecnologias de processamento que visam preservar as características qualitativas, ativas e nutricionais dos produtos (Galanakis; Mavropoulos; Dederichs, 2006).

A exploração das possibilidades e vantagens proporcionadas por essas tecnologias inovadoras,

aliada à compreensão e ao controle das interações entre processo, estrutura e funcionalidade dos alimentos, possibilita o desenvolvimento de produtos personalizados com base em evidências científicas. Entre as principais tecnologias emergentes destacam-se a alta pressão hidrostática (HHP) ultrassom (US), processamento por micro-ondas, o campo elétrico pulsado, Irradiação, o uso de fluidos supercríticos e o plasma frio (CP) reconhecidas por sua flexibilidade e potencial de aplicação em escala industrial (Galanakis, 2013; Knorr *et al.*, 2011).

De modo geral, essas tecnologias diferenciam-se dos métodos convencionais por dispensarem o uso de altas temperaturas, utilizando mecanismos de transferência de energia capazes de promover aquecimento interno, como o aquecimento resistivo nos campos elétricos pulsados e o aquecimento adiabático na alta pressão hidrostática. Essa característica permite reduzir significativamente os danos às propriedades sensoriais, nutricionais e funcionais dos alimentos, contribuindo para a obtenção de produtos com maior qualidade e melhor preservação de seus compostos bioativos (Galanakis, 2021)

Nesse contexto, este capítulo de livro apresenta os avanços mais recentes relacionados à pesquisa e à utilização dessas tecnologias, evidenciando seu potencial para impulsionar novas estratégias de desenvolvimento, processos e produtos alimentares por meio da integração entre a ciência e a tecnologia de alimentos.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 ALIMENTOS PROMOTORES DA SAÚDE

O aumento da conscientização dos consumidores tem impulsionado a demanda por compostos naturais em setores estratégicos da economia. Entretanto, os produtores frequentemente precisam equilibrar essa tendência com restrições econômicas, recorrendo, em alguns casos, ao uso de substitutos mais acessíveis para determinados ingredientes (Marventano *et al.*, 2015).

Desde o início da década de 1990, os progressos nas ciências da vida e nas tecnologias de alimentos levaram ao desenvolvimento do conceito de alimentos funcionais, destinados não apenas à nutrição básica, mas também à promoção da saúde e à redução do risco de determinadas doenças. Esses alimentos representam uma ampliação do papel dos alimentos convencionais, oferecendo novas perspectivas e oportunidades significativas tanto para a indústria alimentícia quanto para a pesquisa na área de nutrição. Os alimentos funcionais passaram a ser objeto de interesse em pesquisas de mercado, impulsionando a realização de diversos estudos voltados à análise da aceitação do consumidor. Essas investigações têm avaliado a disposição dos consumidores em adquirir alimentos funcionais hipotéticos com diferentes características, incluindo métodos de processamento, perfis de sabor, efeitos potenciais sobre a saúde e alegações relacionadas a benefícios funcionais (Bech-Larsen; Grunert, 2003; Van Kleef *et al.*, 2002).

2.2 ALIMENTOS FUNCIONAIS E ALIMENTOS ENRIQUECIDOS

Os alimentos são fontes de diversos nutrientes e compostos bioativos, incluindo lipídios, peptídeos e antioxidantes, que desempenham funções essenciais para a saúde e a nutrição humana. O interesse em desenvolver alimentos com propriedades benéficas adicionais, por meio do aproveitamento de seus componentes naturais, impulsionou a indústria de alimentos a investir mais em pesquisas e na criação dos chamados alimentos funcionais (Day *et al.*, 2009).

O termo bioativo é utilizado como sinônimo de biologicamente ativo, referindo-se a substâncias capazes de exercer algum efeito sobre organismos vivos (Martirosyan; Miller, 2018). Esses compostos podem exercer diversos efeitos benéficos, como ação antioxidante, modulação da atividade enzimática, regulação da ação de receptores celulares e influência sobre a expressão de genes, podendo estimular ou inibir sua atividade. De modo geral, os compostos bioativos podem ser provenientes de fontes vegetais, animais ou microbianas e abrangem diferentes classes de substâncias, como ácidos graxos poli-insaturados, peptídeos, polifenóis, vitaminas e carotenoides. Devido às suas propriedades biológicas e aos potenciais benefícios para a saúde, esses compostos têm despertado crescente interesse da comunidade científica (Aguar; Estevinho; Santos, 2016; Georganas *et al.*, 2020). Esses compostos são amplamente reconhecidos por seus benefícios à saúde, o que tem impulsionado seu uso em diferentes setores da indústria.

Entre os antioxidantes naturais, destacam-se os tocoferóis, polifenóis, ácido ascórbico e carotenoides, reconhecidos por sua capacidade de reduzir o estresse oxidativo, retardar o envelhecimento celular e auxiliar na prevenção da aterosclerose. Esses compostos também encontram aplicação como conservantes naturais em alimentos, especialmente em óleos vegetais e produtos cárneos, e como ingredientes em formulações de protetores solares devido à sua ação antioxidante (Nagarajan *et al.*, 2019).

Os ingredientes alimentares funcionais (Tabela 1) vêm sendo amplamente estudados como aditivos capazes de enriquecer alimentos, melhorando suas propriedades tecnológicas e contribuindo para o desenvolvimento de produtos com benefícios à saúde (Galanakis, 2012). Durante a pandemia de COVID-19, compostos bioativos também passaram a ser considerados como potenciais aliados no fortalecimento do sistema imunológico (Galanakis *et al.*, 2020). Além disso, diversos estudos epidemiológicos indicam que a ingestão de determinados nutrientes está relacionada à redução do risco de doenças crônicas, como diabetes, acidente vascular cerebral e doença arterial coronariana. Essa associação tem sido observada tanto para micronutrientes quanto para macronutrientes presentes na alimentação (Galanakis, 2021).

Tabela 1: Ingredientes funcionais obtidos por tecnologias emergentes

Ingrediente funcional	Fonte alimentícia	Alegação Funcional	Tecnologia Emergente	Aplicação	Referências
Prebióticos	Inulina, chicória, resíduos vegetais	Crescimento de bactérias benéficas	Ultrassom	Barras de cereais, bebidas, produtos Lácteos	(Cassani; Tomadoni; Del Rosario Moreira, 2020)
Compostos fenólicos	Cascas e sementes de frutas	Ação antioxidante e antiinflamatória	Extração por fluidos supercríticos, ultrassom e micro-ondas	Sucos, alimentos enriquecidos, nutracêutico	(Jadhav; Annapure; Deshmukh, 2021)
Carotenoides	Tomate, cenoura, micro	Saúde ocular e atividade antioxidante	Extração com CO ₂ , supercrítico	Bebidas, cápsulas, alimentos Fortificados	(Lefebvre; Destandau; Lesellier, 2021)
Polifenóis de subprodutos	Bagaço de uva, casca de manga, casca de café	Ação antioxidante e economia circular	Extração assistida por ultrassom, micro-ondas	Ingredientes naturais para alimentos e bebidas	(Barbosa-Cánovas <i>et al.</i> , 2022)
Compostos fenólicos de subprodutos	Bagaço de uva, bagaço de tomate	Ação antioxidante e economia Circular	Plasma frio	Ingredientes naturais para alimentos e Bebidas	(Bao; Reddivari; Huang, 2020a, 2020b)

O desenvolvimento de alimentos funcionais requer a consideração de diferentes fatores que vão além do valor nutricional, incluindo atributos sensoriais como textura, sabor, cor e sensação na boca, os quais influenciam diretamente a aceitação pelos consumidores. Do ponto de vista da indústria alimentícia, a incorporação de ingredientes funcionais apresenta desafios tecnológicos, sendo as bebidas e os smoothies algumas das formulações mais utilizadas devido à facilidade de enriquecimento. Em alimentos de consistência macia, como os iogurtes, características como estabilidade e propriedades estruturais são fundamentais para garantir a qualidade do produto e atender às expectativas do consumidor (Parada; Aguilera, 2007). Independentemente do tipo de alimento, a biodisponibilidade dos nutrientes permanece como um dos principais requisitos para que os benefícios funcionais sejam efetivos. Dessa forma, os processos de fabricação devem ser cuidadosamente planejados para preservar tanto as características sensoriais quanto a qualidade e a atividade dos compostos bioativos durante o armazenamento e o consumo (Day *et al.*, 2009)

3 TECNOLOGIAS EMERGENTES APLICADAS AO DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS

3.1 PROCESSAMENTO DE ALTA PRESSÃO

O processamento por alta pressão (do inglês HPP), também denominado processamento por alta pressão hidrostática, pressão hiperbárica ou pascalização, consiste em uma tecnologia não térmica

alternativa aos métodos convencionais de conservação de alimentos baseados em calor, com impacto reduzido sobre a qualidade do produto. Essa técnica tem sido amplamente aplicada na conservação de frutas e hortaliças, contribuindo para a preservação do sabor natural, do valor nutricional e para o prolongamento da vida útil dos alimentos (Bolumar *et al.*, 2016; Dhiman *et al.*, 2021a).

A tecnologia de alta pressão (AP) apresenta grande potencial na engenharia de textura de alimentos, em razão de sua capacidade de modificar as propriedades funcionais dos diferentes componentes alimentares. Em geral, a estrutura primária de moléculas de baixo peso molecular, como peptídeos, lipídios, vitaminas e açúcares, permanece praticamente inalterada sob condições de AP isostática, devido à baixa compressibilidade das ligações covalentes em pressões inferiores a 2 GPa. Em contrapartida, macromoléculas como o amido podem sofrer alterações em sua estrutura nativa quando submetidas a esse tipo de processamento, apresentando modificações semelhantes às observadas em tratamentos térmicos (Oey *et al.*, 2006).

3.2 TRATAMENTO COM PLASMA FRIO

O plasma frio (PF) é uma das tecnologias emergentes de processamento não térmico de alimentos, empregada principalmente para a inativação de microrganismos por meio de sua aplicação direta na superfície dos produtos, promovendo alterações mínimas em suas características. Além disso, essa tecnologia tem sido utilizada na redução de fatores antimicrobianos naturais, na diminuição de alérgenos alimentares, bem como na melhoria das propriedades de barreira de proteínas e na modificação estrutural de proteínas alimentares (Dhiman *et al.*, 2021b).

Nessa técnica, a aplicação de energia proveniente de fontes ópticas, térmicas, elétricas ou eletromagnéticas a um meio gasoso leva à formação de um estado da matéria caracterizado pela presença de espécies reativas de nitrogênio e oxigênio, além de radiação ultravioleta. Esse processo promove a ruptura das ligações moleculares do gás, resultando em sua ionização parcial ou total, originando o chamado plasma (Akharume; Aluko; Adedeji, 2021).

3.3 ULTRASSOM

Nos últimos anos, o uso do ultrassom como tecnologia auxiliar no processamento de alimentos tem despertado grande interesse no campo da ciência e tecnologia de alimentos. Diversos estudos têm demonstrado seus benefícios em diferentes aplicações, incluindo a otimização de processos térmicos, o aumento da eficiência na transferência de massa, a preservação da qualidade dos alimentos e o aprimoramento das propriedades de textura, além de sua utilização em análises e modificações estruturais dos produtos alimentícios (Knorr *et al.*, 2011).

No processamento de alimentos, frequências ultrassônicas entre 20 e 100 kHz são amplamente

empregadas em diversas aplicações, como extração de compostos bioativos, emulsificação, cozimento, redução do amargor e intensificação de processos de síntese, entre outras. Segundo Jadhav *et al.* (2021), a utilização da sonicação na síntese de lipídios estruturados representa uma estratégia eficiente para aumentar o rendimento da reação. Os autores observaram um rendimento máximo de 92% após 6 horas de processamento. Esse desempenho é atribuído ao incremento da energia fornecida pelo ultrassom, que promove a formação de regiões de alta energia, favorecendo a transferência de massa e acelerando a cinética reacional, o que resulta na conclusão da reação em menor tempo.

A síntese assistida por ultrassom apresenta maior rapidez quando comparada aos métodos convencionais. Além de acelerar o processo reacional, o ultrassom favorece a transferência de massa na interface entre as fases, aumentando a eficiência da extração de compostos bioativos provenientes de matérias-primas vegetais e animais. Como resultado, essa tecnologia proporciona não apenas maiores rendimentos de extração, mas também contribui para a melhoria das propriedades físico - químicas dos compostos obtidos (Adhav; Annapure, 2021). Além disso, o ultrassom propagado pelo ar tem sido aplicado na eliminação de espuma em bebidas carbonatadas e em processos fermentativos, contribuindo para o controle da formação excessiva de espuma durante essas operações.

3.4 PROCESSAMENTO COM MICRO-ONDAS

A tecnologia de micro-ondas (MW) tem sido amplamente empregada no processamento de alimentos, sendo aplicada em diversas operações unitárias, como descongelamento, temperagem, cozimento, branqueamento, secagem e pasteurização. Seu princípio de funcionamento baseia-se na incidência direta das ondas eletromagnéticas sobre o alimento, promovendo aquecimento volumétrico por meio dos mecanismos de condução iônica e rotação dipolar das moléculas. A eficiência desse processo está diretamente relacionada às propriedades dielétricas da matriz alimentar, especialmente à constante dielétrica e ao fator de perda dielétrica, que determinam a capacidade do alimento de absorver e converter a energia das micro-ondas em calor (Suhag *et al.*, 2021).

A pasteurização por micro-ondas tem sido aplicada com frequência no processamento de alimentos líquidos, como leite e sucos frescos, além de outros produtos alimentícios, incluindo carnes e derivados de origem animal. O estudo de Salazar-González *et al.* (2012) reuniu informações sobre o uso dessa tecnologia na pasteurização de sucos e na esterilização do leite, destacando também sua eficácia na inativação de microrganismos e enzimas em diferentes alimentos líquidos, como suco e sidra de maçã, água de coco, suco de uva, leite e purê de batata-doce. Os autores ressaltam que o conhecimento das propriedades dielétricas dos alimentos é essencial para definir as condições adequadas de aplicação da energia de micro-ondas, permitindo alcançar a eficiência e a letalidade desejadas no processo.

3.5 IRRADIAÇÃO

A irradiação de alimentos consiste na exposição dos produtos alimentícios à radiação ionizante proveniente de fontes como raios gama, raios X ou feixes de elétrons. Esse processo promove alterações na permeabilidade das paredes celulares, favorecendo diferentes aplicações tecnológicas. Na indústria de alimentos, essa tecnologia é utilizada para reduzir a carga de microrganismos patogênicos, realizar a esterilização de produtos, retardar o processo de maturação, prolongar a vida útil, inibir a germinação de vegetais e controlar infestações por insetos (Mshelia; Dibal; Chiroma, 2023).

A principal aplicação da tecnologia de irradiação na indústria de alimentos está relacionada à descontaminação microbiológica de especiarias, ervas e condimentos (Jung *et al.*, 2015). Além disso, pesquisas mais recentes demonstram que o uso de doses elevadas de irradiação (superiores a 15 kGy) é eficaz e seguro para produtos cárneos prontos para o consumo, enquanto doses mais baixas, entre 1 e 3 kGy, apresentam bons resultados na conservação de cogumelos frescos (Feliciano *et al.*, 2014). A irradiação também se destaca como uma alternativa eficiente para a esterilização de alimentos, pois contribui para o aumento da vida útil dos produtos ao reduzir a deterioração e controlar microrganismos responsáveis por doenças transmitidas por alimentos. Como consequência, essa tecnologia fortalece a percepção de segurança dos consumidores, aumentando sua aceitação e disposição para adquirir alimentos submetidos a esse tipo de processamento (Shalaby *et al.*, 2016).

3.6 CAMPO ELÉTRICO PULSADO

A tecnologia de campo elétrico pulsado promove a inativação de microrganismos por meio da aplicação de pulsos curtos de alta intensidade elétrica. Esses pulsos provocam alterações estruturais na membrana celular, formando poros em um fenômeno denominado eletroporação. O comprometimento da integridade da membrana resulta na perda das funções celulares, levando à morte dos microrganismos e, consequentemente, à sua inativação (Cavalcanti *et al.*, 2023).

No processamento por campo elétrico pulsado, o alimento é submetido à aplicação de pulsos elétricos de alta intensidade durante um intervalo de tempo extremamente curto (Niu *et al.*, 2020). Em geral, a intensidade do campo utilizada varia entre 25 e 85 kV/cm, enquanto o tempo de exposição ocorre na escala de milissegundos ou até nanossegundos. Devido à curta duração do tratamento, o aumento da temperatura do alimento é mínimo, caracterizando essa tecnologia como um método não térmico. Dessa forma, evitam-se as alterações indesejáveis normalmente associadas ao aquecimento, contribuindo para a preservação das características nutricionais e sensoriais do produto. Essa tecnologia apresenta elevada eficiência no processamento de diversos alimentos líquidos, como leite, sucos de frutas e bebidas do tipo smoothie, uma vez que esses produtos permitem a distribuição homogênea do campo elétrico durante o tratamento (Vorobiev; Lebovka, 2019).

3.7 TRATAMENTO COM OZÔNIO

O tratamento com ozônio baseia-se na utilização desse gás, reconhecido por seu elevado poder oxidante, para promover a inativação de microrganismos (Dubey; Singh; Yousuf, 2022). Na forma gasosa ou dissolvida em água, o ozônio favorece a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), capazes de reagir com componentes essenciais das células microbianas, comprometendo sua integridade e levando à sua destruição. Entretanto, quando empregado em concentrações elevadas ou por períodos prolongados, o excesso de EROs pode provocar alterações oxidativas na matriz alimentar. Entre os principais efeitos estão a peroxidação de lipídios, a oxidação de proteínas, mudanças na coloração, o surgimento de sabores indesejáveis e a degradação de nutrientes sensíveis à oxidação, como o ácido ascórbico e o licopeno (Sitoe *et al.*, 2026).

O ozônio é reconhecido por sua elevada ação antimicrobiana e por suas diversas aplicações na indústria química e alimentícia, contribuindo para o aumento da vida útil de diferentes alimentos. Além disso, é empregado na desinfecção de água destinada ao consumo humano, na degradação de resíduos de pesticidas, no estímulo à germinação de sementes e na modificação do amido. Entre as técnicas de modificação desse polímero, destaca-se a oxidação, que tradicionalmente utiliza agentes químicos como hipoclorito de sódio, persulfato de amônio e peróxido de hidrogênio. Entretanto, esses reagentes apresentam desvantagens, incluindo dificuldades no descarte, possibilidade de resíduos nos produtos, menor eficiência de processo e riscos relacionados à segurança. Diante desse cenário, a busca por alternativas mais sustentáveis e ambientalmente adequadas tem impulsionado o uso do ozônio como uma opção promissora para substituir os métodos convencionais de oxidação do amido (Raghunathan *et al.*, 2021).

3.8 FLUIDO SUPERCRÍTICO

A tecnologia supercrítica baseia-se no uso de fluidos supercríticos, que representam uma alternativa eficiente aos solventes orgânicos empregados em diferentes processos. Um fluido passa a ser considerado supercrítico quando é submetido a temperaturas e pressões superiores aos seus valores críticos. Nesse estado, ele combina características típicas de líquidos e gases, apresentando densidade próxima à dos líquidos, enquanto sua viscosidade e difusividade se assemelham às dos gases (Zhang; Lin; Ye, 2018).

Os fluidos supercríticos possuem propriedades físico-químicas que os tornam solventes altamente eficientes, favorecendo uma maior transferência de massa durante a extração de compostos bioativos provenientes de matérias-primas de origem vegetal e animal. Essas características podem ser ajustadas por meio de variações na temperatura e na pressão, permitindo otimizar o desempenho do processo conforme a aplicação desejada. Embora diferentes substâncias possam ser empregadas como fluidos supercríticos, o dióxido de carbono é o mais utilizado na indústria de alimentos devido às suas condições críticas relativamente baixas, atingindo o estado supercrítico a aproximadamente 31,1 °C e 7,4 MPa. Além de ser

aplicado em processos de extração, os fluidos supercríticos também são utilizados na inativação de microrganismos, na intensificação da transferência de massa em reações de síntese e em diversas outras operações industriais. Entre essas aplicações, a extração é a que apresenta maior destaque e difusão no setor alimentício (Deotale *et al.*, 2021). Como por exemplo, na extração de carotenoides a partir de subprodutos do tomate no estudo de Kehili *et al.* (2017), apresentando desempenho superior aos métodos convencionais na recuperação de licopeno. A extração por fluido supercrítico (EFS) alcançou um rendimento de 728,98 mg de licopeno por quilograma de matéria seca, valor significativamente superior ao obtido pelos processos tradicionais de extração.

3.9 LUZ ULTRAVIOLETA (UV)

A tecnologia de luz pulsada consiste na emissão de pulsos intensos e de curta duração de radiação eletromagnética em alta potência. Esses pulsos abrangem diferentes faixas do espectro eletromagnético, incluindo a radiação ultravioleta (100–400 nm), a luz visível (400–700 nm) e a radiação infravermelha (700–1000 nm) (Mahendran *et al.*, 2019). As radiações compreendidas na faixa de 100 a 1000 nm apresentam capacidade limitada de penetração nos materiais, em razão de suas características físicas. Entre elas, a radiação ultravioleta (UV) destaca-se por apresentar maior poder de penetração em comparação com as faixas de luz visível e infravermelha, sendo, por isso, a mais empregada na inativação de microrganismos. Mesmo assim, sua ação permanece predominantemente superficial, tornando a tecnologia de luz pulsada mais eficaz na descontaminação da superfície de alimentos como uma alternativa não térmica para alimentos e ingredientes líquidos, e de materiais utilizados em embalagens (Balthazar *et al.*, 2022). A tecnologia UV pulsada está entre as tecnologias não térmicas mais populares no setor de processamento de alimentos. Devido à sua natureza econômica, também está sendo experimentada em escala piloto para a inativação de micróbios.

No geral, as tecnologias emergentes de processamento de alimentos possibilitam tratamentos menos intensivos, contribuindo para a preservação das características sensoriais, dos compostos bioativos e de sua funcionalidade ao longo do armazenamento. Essas tecnologias têm sido amplamente estudadas e incorporadas pela indústria de alimentos devido ao seu potencial para reduzir a intensidade do aquecimento e o tempo de processamento, aumentar a eficiência energética e melhorar a qualidade final dos produtos (Galanakis; Tsatalas; Galanakis, 2018; Roselló-Soto *et al.*, 2015b). A Tabela 2 apresenta os tipos de tecnologias emergentes mais comuns destacando as vantagens e limitações do processamento aplicadas ao desenvolvimento de alimentos.

Tabela 2: Tecnologias não térmicas: vantagens e limitações

Tecnologia	Vantagens	Limitações	Referências
Processamento de alta pressão hidrostática (HPP)	Sem danos causados pelo calor, ecológico, inativação microbiana. Capacidade de tratar a matriz alimentar de maneira uniforme	Aumentar a segurança, melhorar a qualidade dos alimentos e preservar os nutrientes; Baixa eficácia contra esporos	(HUANG; HSU; WANG, 2020)
Plasma frio	Preservar o conteúdo nutricional, sem alteração sensorial, Integridade física e estrutural, Integridade composicional	A segurança, toxicidade e/ou efeitos na saúde de produtos alimentícios; Volume, tamanho do produto alimentício	(CHERIF <i>et al.</i> , 2023; COUTINHO <i>et al.</i> , 2018)
Ultrassom	Menor tempo de exposição, menor uso de solventes, maiores rendimentos, alta reprodutibilidade e baixo consumo de energia	segurança alimentar, eficiência, energia e custo operacional; Oxidação avançada	(ROSELLÓ-SOTO <i>et al.</i> , 2015a)
Campos elétrico pulsado (PEF)	Geração de calor mínima ou inexistente	Sem eficácia para inativar esporos bacterianos; Aplicação do PEF em larga escala,	(HUANG <i>et al.</i> , 2012)
Luz ultravioleta (UV)	Técnica ecológica, tratamento rápido e sem necessidade de produtos químicos	Baixa capacidade de penetração; isomerização e oxidação do licopeno,	(BAHRAMI <i>et al.</i> , 2020)
Ozônio	Eficaz contra microrganismos, forte agente oxidante, longa vida útil, tecnologia verde; Econômico, livre de produtos químicos, ecológico e fácil de usar	Econômico, Poder oxidante, instável; Penetração limitada em certos alimentos e potencial exposição a substâncias químicas nocivas (cancerígenas), como os bromatos.	(ROOBAB <i>et al.</i> , 2022)
Radiações Ionizantes	Remove eficazmente os patógenos, prolonga a vida útil e afeta minimamente o valor nutricional.	Feixes de elétrons têm uma profundidade de penetração limitada; acelera a auto oxidação de lipídios	(OTTO <i>et al.</i> , 2011)
Fluido supercrítico	Alta eficiência de extração, Condições críticas são atingidas a baixas temperaturas,	Muitos parâmetros a serem otimizados, dificuldade de extrair compostos polares sem a adição de modificadores, Coextração de classes de compostos não desejadas.	(DJAS; HENCZKA, 2018; GALANAKIS, 2012)
Aquecimento por micro-ondas (MWH)	Transferência de calor rápida em um curto tempo de reação, aquecimento volumétrico uniforme, eficiência energética, baixo nível de degradação ou formação de produtos secundários	Baixa profundidade de penetração; Aquecimento não uniforme	(DAI <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Adaptado

4 CONCLUSÃO

A evolução das tecnologias emergentes tem transformado de maneira significativa o

desenvolvimento de alimentos promotores da saúde, permitindo a criação de produtos mais seguros, nutritivos, sustentáveis e alinhados às necessidades específicas da população. Nesse contexto, o desenvolvimento de alimentos promotores da saúde deve ser orientado não apenas pela inovação tecnológica, mas também pelo compromisso com a promoção da qualidade de vida e da saúde da população. A incorporação de ingredientes bioativos, a personalização da alimentação e a utilização de processos produtivos mais eficientes e sustentáveis evidenciam o potencial dessas tecnologias para responder aos desafios contemporâneos relacionados às doenças crônicas não transmissíveis, ao envelhecimento populacional e à segurança alimentar global. Assim, as tecnologias emergentes consolidam-se como ferramentas estratégicas para enfrentar os desafios da saúde pública e da segurança alimentar, contribuindo para a construção de sistemas alimentares mais resilientes, inovadores e comprometidos com o bem-estar da população.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil), Código de Financiamento 001 pela assistência financeira.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O suporte da ferramenta ChatGPT, versão -5o, da OpenAI, foi utilizado neste manuscrito para aprimorar a fluidez, o estilo e a clareza da linguagem. Todas as sugestões geradas foram revisadas, editadas e validadas pela autora, que assume total responsabilidade pelo conteúdo final do capítulo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J.; ESTEVINHO, B. N.; SANTOS, L. Microencapsulation of natural antioxidants for food application – The specific case of coffee antioxidants – A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 58, p. 21–39, dez. 2016.
- AKHARUME, Felix U.; ALUKO, Rotimi E.; ADEDEJI, Akinbode A. Modification of plant proteins for improved functionality: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 1, p. 198–224, 4 jan. 2021.
- BAHRAMI, Akbar *et al.* Efficiency of novel processing technologies for the control of *Listeria monocytogenes* in food products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 96, p. 61–78, fev. 2020.
- BALTHAZAR, Celso F. *et al.* The future of functional food: Emerging technologies application on prebiotics, probiotics and postbiotics. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, n. 3, p. 2560–2586, 26 maio 2022.

BAO, Yiwen; REDDIVARI, Lavanya; HUANG, Jen-Yi. Development of cold plasma pretreatment for improving phenolics extractability from tomato pomace. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 65, p. 102445, out. 2020a.

BAO, Yiwen; REDDIVARI, Lavanya; HUANG, Jen-Yi. Enhancement of phenolic compounds extraction from grape pomace by high voltage atmospheric cold plasma. **LWT**, v. 133, p. 109970, nov. 2020b.

BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. *et al.* Nonthermal Processing Technologies for Stabilization and Enhancement of Bioactive Compounds in Foods. **Food Engineering Reviews**, v. 14, n. 1, p. 63–99, 11 mar. 2022.

BECH-LARSEN, Tino; GRUNERT, Klaus G. The perceived healthiness of functional foods. **Appetite**, v. 40, n. 1, p. 9–14, fev. 2003.

BOLUMAR, Tomas *et al.* Structural Changes in Foods Caused by High-Pressure Processing. In: BALASUBRAMANIAM, V.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; LELIEVELD, H. (ed.). *High Pressure Processing of Food*. New York: Springer, 2016. p. 509–537.

CASSANI, Lucía; TOMADONI, Bárbara; DEL ROSARIO MOREIRA, María. Green ultrasound-assisted processing for extending the shelf-life of prebiotic-rich strawberry juices. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 15, p. 5518–5526, 28 dez. 2020.

CAVALCANTI, Rodrigo N. *et al.* Pulsed electric field-based technology for microbial inactivation in milk and dairy products. **Current Opinion in Food Science**, v. 54, p. 101087, dez. 2023.

CHERIF, Mohamed Majdi *et al.* Review on Recent Applications of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production: Principles, Implementation, and Application Limits. **Applied Sciences**, v. 13, n. 4, p. 2381, 13 fev. 2023.

CHIOZZI, Viola; AGRIOPOULOU, Sofia; VARZAKAS, Theodoros. Advances, Applications, and Comparison of Thermal (Pasteurization, Sterilization, and Aseptic Packaging) against Non-Thermal (Ultrasounds, UV Radiation, Ozonation, High Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, p. 2202, 20 fev. 2022.

COUTINHO, Nathalia M. *et al.* Cold plasma processing of milk and dairy products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 74, p. 56–68, abr. 2018.

DAI, Leilei *et al.* Comparative study on microwave and conventional hydrothermal pretreatment of bamboo sawdust: Hydrochar properties and its pyrolysis behaviors. **Energy Conversion and Management**, v. 146, p. 1–7, ago. 2017.

DAY, Li *et al.* Incorporation of functional ingredients into foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, n. 9, p. 388–395, set. 2009.

DEOTALE, Shweta M. *et al.* **Advances in Supercritical Carbon dioxide Assisted Sterilization of Biological Matrices**. In: *Innovative Food Processing Technologies*. [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 660–677.

DHIMAN, Atul *et al.* Status of beetroot processing and processed products: Thermal and emerging technologies intervention. **Trends in Food Science & Technology**, v. 114, p. 443–458, ago. 2021a.

DHIMAN, Atul *et al.* Status of beetroot processing and processed products: Thermal and emerging technologies intervention. **Trends in Food Science & Technology**, v. 114, p. 443–458, ago. 2021b.

DJAS, Małgorzata; HENCZKA, Marek. Reactive extraction of carboxylic acids using organic solvents and supercritical fluids: A review. **Separation and Purification Technology**, v. 201, p. 106–119, ago. 2018.

DUBEY, Priyanka; SINGH, Anupama; YOUSUF, Owais. Ozonation: an Evolving Disinfectant Technology for the Food Industry. **Food and Bioprocess Technology**, v. 15, n. 9, p. 2102–2113, 15 set. 2022.

FELICIANO, Chitho P. *et al.* Radiation-treated ready-to-eat (RTE) chicken breast Adobo for immuno-compromised patients. **Food Chemistry**, v. 163, p. 142–146, nov. 2014.

GALANAKIS, Charis M. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 26, n. 2, p. 68–87, ago. 2012.

GALANAKIS, Charis M. Emerging technologies for the production of nutraceuticals from agricultural by-products: A viewpoint of opportunities and challenges. **Food and Bioprocess Technology**, v. 91, n. 4, p. 575–579, out. 2013.

GALANAKIS, Charis M. *et al.* Food Ingredients and Active Compounds against the Coronavirus Disease (COVID-19) Pandemic: A Comprehensive Review. **Foods**, v. 9, n. 11, p. 1701, 20 nov. 2020.

GALANAKIS, Charis M. Functionality of Food Components and Emerging Technologies. **Foods**, v. 10, n. 1, p. 128, 8 jan. 2021.

GALANAKIS, Charis M.; TSATALAS, Philippos; GALANAKIS, Ioannis M. Implementation of phenols recovered from olive mill wastewater as UV booster in cosmetics. **Industrial Crops and Products**, v. 111, p. 30–37, jan. 2018.

GALANAKIS, I.; MAVROPOULOS, Ph; DEDERICHS, P. H. Electronic structure and Slater–Pauling behaviour in half-metallic Heusler alloys calculated from first principles. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 39, n. 5, p. 765–775, 7 mar. 2006.

GEORGANAS, Alexandros *et al.* Bioactive Compounds in Food Waste: A Review on the Transformation of Food Waste to Animal Feed. **Foods**, v. 9, n. 3, p. 291, 5 mar. 2020.

HUANG, Hsiao-Wen; HSU, Chiao-Ping; WANG, Chung-Yi. Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 28, n. 1, p. 1–13, jan. 2020.

HUANG, Kang *et al.* A review of kinetic models for inactivating microorganisms and enzymes by pulsed electric field processing. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 2, p. 191–207, jul. 2012.

JADHAV, Harsh B. *et al.* Intensified synthesis of palm olein designer lipids using sonication. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, p. 105478, maio 2021.

JADHAV, Harsh B.; ANNAPURE, Uday. Process intensification for synthesis of triglycerides of capric acid using green approaches. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 98, n. 2, p. 100030, fev. 2021.

JADHAV, Harsh Bhaskar; ANNAPURE, Uday S.; DESHMUKH, Rajendra R. Non-thermal Technologies for Food Processing. **Frontiers in Nutrition**, v. 8, 8 jun. 2021.

JUNG, Koo *et al.* Effect of X-ray, gamma ray, and electron beam irradiation on the hygienic and physicochemical qualities of red pepper powder. **LWT - Food Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 846–851, out. 2015.

KEHILI, Mouna *et al.* Supercritical CO₂ extraction and antioxidant activity of lycopene and β -carotene-enriched oleoresin from tomato (*Lycopersicum esculentum* L.) peels by-product of a Tunisian industry. **Food and Bioproducts Processing**, v. 102, p. 340–349, mar. 2017.

KNORR, D. *et al.* Emerging Technologies in Food Processing. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 203–235, 10 abr. 2011.

LEFEBVRE, Thibault; DESTANDAU, Emilie; LESELLIER, Eric. Sequential extraction of carnosic acid, rosmarinic acid and pigments (carotenoids and chlorophylls) from Rosemary by online supercritical fluid extraction-supercritical fluid chromatography. **Journal of Chromatography A**, v. 1639, p. 461709, fev. 2021.

MAHENDRAN, R. *et al.* Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. **Trends in Food Science & Technology**, v. 88, p. 67–79, jun. 2019.

MARTIROSYAN, Danik; MILLER, Emma. Bioactive Compounds: The Key to Functional Foods. **Bioactive Compounds in Health and Disease**, v. 1, n. 3, p. 36, 31 jul. 2018.

MARVENTANO, Stefano *et al.* A review of recent evidence in human studies of n-3 and n-6 PUFA intake on cardiovascular disease, cancer, and depressive disorders: does the ratio really matter? **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 66, n. 6, p. 611–622, 18 ago. 2015.

MSHELIA, Rebecca Dan-zaria; DIBAL, Nathan Isaac; CHIROMA, Samaila Musa. Food irradiation: an effective but under-utilized technique for food preservations. **Journal of Food Science and Technology**, v. 60, n. 10, p. 2517–2525, 13 out. 2023.

NAGARAJAN, Jayesree *et al.* A facile water-induced complexation of lycopene and pectin from pink guava byproduct: Extraction, characterization and kinetic studies. **Food Chemistry**, v. 296, p. 47–55, out. 2019.

NIU, Debao *et al.* Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. **Food Research International**, v. 137, p. 109715, nov. 2020.

OHEY, I. *et al.* Temperature and pressure stability of l-ascorbic acid and/or [6s] 5-methyltetrahydrofolic acid: A kinetic study. **European Food Research and Technology**, v. 223, n. 1, p. 71–77, 13 maio 2006.

OTTO, Clemens *et al.* Physical Methods for Cleaning and Disinfection of Surfaces. **Food Engineering Reviews**, v. 3, n. 3–4, p. 171–188, 22 dez. 2011.

PARADA, J.; AGUILERA, J. M. Food Microstructure Affects the Bioavailability of Several Nutrients. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 2, 12 mar. 2007.

RAGHUNATHAN, R. *et al.* The application of emerging non-thermal technologies for the modification of cereal starches. **LWT**, v. 138, p. 110795, mar. 2021.

ROOBAB, Ume *et al.* Emerging Trends for Nonthermal Decontamination of Raw and Processed Meat: Ozonation, High-Hydrostatic Pressure and Cold Plasma. **Foods**, v. 11, n. 15, p. 2173, 22 jul. 2022.

ROSELLÓ-SOTO, Elena *et al.* Clean recovery of antioxidant compounds from plant foods, by-products and algae assisted by ultrasounds processing. Modeling approaches to optimize processing conditions. **Trends in Food Science & Technology**, v. 42, n. 2, p. 134–149, abr. 2015a.

ROSELLÓ-SOTO, Elena *et al.* High Voltage Electrical Discharges, Pulsed Electric Field, and Ultrasound Assisted Extraction of Protein and Phenolic Compounds from Olive Kernel. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, n. 4, p. 885–894, 17 abr. 2015b.

SALAZAR-GONZÁLEZ, Claudia *et al.* Recent Studies Related to Microwave Processing of Fluid Foods. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 1, p. 31–46, 5 jan. 2012.

SHALABY, Ali R. *et al.* Quality and safety of irradiated food regarding biogenic amines: Ras cheese. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 51, n. 4, p. 1048–1054, 9 abr. 2016.

SITOE, Eugénio da Piedade Edmundo *et al.* Exploiting Ozone for post-Harvest Preservation of Fruits and Vegetables: Application Techniques, Quality Effects, and Regulatory Frameworks. **Food Reviews International**, v. 42, n. 3, p. 1692–1723, 3 abr. 2026.

SUHAG, Rajat *et al.* Microwave processing: A way to reduce the anti-nutritional factors (ANFs) in food grains. **LWT**, v. 150, p. 111960, out. 2021.

VAN KLEEF, Ellen *et al.* Consumer-oriented functional food development: how well do functional disciplines reflect the ‘voice of the consumer’? **Trends in Food Science & Technology**, v. 13, n. 3, p. 93–101, mar. 2002.

VOROBIEV, Eugene; LEOVKA, Nikolai. **Pulsed electric field in green processing and preservation of food products**. In: Green Food Processing Techniques. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 403–430.

ZHANG, Qing-Wen; LIN, Li-Gen; YE, Wen-Cai. Techniques for extraction and isolation of natural products: a comprehensive review. **Chinese Medicine**, v. 13, n. 1, p. 20, 17 dez. 2018.

CAPÍTULO 6

EMULSÕES PICKERING ESTABILIZADAS COM β -CICLODEXTRINA: TECNOLOGIA EMERGENTE PARA ENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS E DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS ENRIQUECIDOS

β -CYCLODEXTRIN-STABILIZED PICKERING EMULSIONS: AN EMERGING TECHNOLOGY FOR BIOACTIVE COMPOUND ENCAPSULATION AND THE DEVELOPMENT OF ENRICHED FOODS

 <https://doi.org/10.63330/livroautor822026-006>

Resumo

A crescente demanda por alimentos com qualidade nutricional, estabilidade e formulações *clean label* tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas capazes de incorporar e proteger compostos bioativos de forma eficiente. Nesse contexto, as emulsões Pickering estabilizadas com β -ciclodextrina (β -CD) apresentam-se como uma tecnologia emergente, devido à sua elevada estabilidade interfacial, capacidade de encapsulação e aumento da estabilidade de compostos suscetíveis à degradação. Esta revisão teve como objetivo analisar a aplicação da β -CD na estabilização de emulsões Pickering, abordando os mecanismos físico-químicos envolvidos, as propriedades tecnológicas e a capacidade de encapsular ingredientes bioativos para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos. A metodologia consistiu em revisão narrativa da literatura, realizada nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, LILACS e SciELO. A análise demonstrou que a β -CD pode promover a estabilização de emulsões Pickering por meio da formação de complexos de inclusão e da adsorção de partículas na interface, proporcionando maior estabilidade físico-química, resistência à coalescência, estabilidade oxidativa e eficiência na proteção de ingredientes bioativos como vitaminas lipossolúveis, carotenoides, compostos fenólicos e ácidos graxos poli-insaturados, contribuindo para a qualidade nutricional dos produtos. Conclui-se que as emulsões Pickering estabilizadas com β -CD pode constituir como estratégia tecnológica promissora para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos com ingredientes bioativos, conciliando estabilidade, proteção oxidativa e formulações *clean label*, e contribuindo para a promoção da saúde. Entretanto, estudos adicionais sobre biodisponibilidade, escalonamento industrial e validação em diferentes matrizes alimentares ainda são necessários para consolidar sua aplicação em escala industrial.

Palavras-chave: Alimentos enriquecidos; β -ciclodextrina; Compostos bioativos; Emulsões Pickering; Encapsulação.

Abstract

The growing demand for foods with nutritional quality, stability and clean-label formulations has driven the development of systems capable of efficiently incorporating and protecting bioactive compounds. In this context, β -cyclodextrin (β -CD)-stabilized Pickering emulsions emerge as a promising technology, owing to their high interfacial stability, encapsulation capacity and ability to increase the stability of degradation-susceptible compounds. This review aimed to analyze the application of β -CD in the stabilization of Pickering emulsions, addressing the physicochemical mechanisms involved, the technological properties, and the capacity to encapsulate bioactive ingredients for the development of enriched foods. The methodology consisted of a narrative literature review conducted in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, LILACS and SciELO. The analysis showed that β -CD promotes the stabilization of Pickering emulsions through the formation of inclusion complexes and particle adsorption at the interface, providing greater physicochemical stability, resistance to coalescence, oxidative stability and efficient protection of bioactive ingredients such as fat-soluble vitamins, carotenoids, phenolic compounds and polyunsaturated fatty acids, contributing to the nutritional quality of the products. It is concluded that β -CD-stabilized Pickering emulsions constitute a promising technological strategy for the development of foods enriched with bioactive ingredients, combining stability, oxidative protection and clean-label formulations, thereby contributing to health promotion. However, further studies on bioavailability, industrial scale-up and validation across different food matrices are still needed to consolidate their industrial-scale application.

Keywords: Bioactive compounds; β -cyclodextrin; Encapsulation; Enriched foods; Pickering emulsions.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda dos consumidores por alimentos com qualidade nutricional superior, estabilidade prolongada e formulações clean label tem reconfigurado as agendas de pesquisa em ciência e tecnologia de alimentos, impulsionando o desenvolvimento de sistemas capazes de incorporar e proteger compostos bioativos sensíveis à degradação como vitaminas lipossolúveis, carotenoides, compostos fenólicos e ácidos graxos poli-insaturados (McClements, 2023; Suhail *et al.*, 2025). A fragilidade físico-química desses compostos frente ao oxigênio, à luz, ao calor e às variações de pH constitui um dos principais desafios tecnológicos para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos e funcionais, exigindo sistemas de encapsulação eficientes e compatíveis com a percepção de naturalidade exigida pelo

consumidor contemporâneo (Christaki *et al.*, 2023; Sarkar; Dickinson, 2020). Nesse cenário, os sistemas emulsionados assumem papel central: além de estruturar produtos sensorialmente aceitáveis, podem funcionar como veículos de proteção de compostos com potencial funcional, ampliando o teor nutricional das matrizes alimentícias (Sarkar; Dickinson, 2020; Suhail *et al.*, 2025). Paralelamente, a consolidação da tendência clean label, caracterizada pela redução de aditivos sintéticos tem estimulado a investigação de partículas naturais capazes de substituir os emulsificantes convencionais (Dickinson, 2017).

Entre as abordagens emergentes, as emulsões Pickering ocupam posição de destaque pois utilizam partículas sólidas anfífilas capazes de adsorvem na interface óleo-água, formando barreira mecânica que pode substituir a ação dos tensoativos convencionais (Pickering, 1907; Chevalier; Bolzinger, 2013). A energia de fixação interfacial dessas partículas, da ordem de 10^4 – 10^7 k_BT, confere notável resistência à coalescência, ao amadurecimento de Ostwald e à separação gravitacional, além de constituir barreira física à difusão de agentes pró-oxidantes até o núcleo lipídico da emulsão (Binks; Lumsdon, 2000; Berton-Carabin; Schroën, 2015).

Nesse contexto, a β -ciclodextrina (β -CD) um oligossacarídeo cíclico obtido pela degradação enzimática do amido, com estrutura de cone truncado, possuindo cavidade interna hidrofóbica e superfície externa hidrofílica, se destaca como partícula estabilizante de interesse tecnológico (Crini, 2014; Christaki *et al.*, 2023). Sua capacidade de formar complexos de inclusão com moléculas lipofílicas confere-lhe dupla funcionalidade, capaz de formar emulsão e complexos inclusão de compostos bioativos (Inoue *et al.*, 2008; Kou *et al.*, 2023). Essa dualidade posiciona a β -CD como tecnologia emergente de encapsulação, com elevada estabilidade interfacial e capacidade de aumentar a estabilidade de compostos suscetíveis à degradação, viabilizando a proteção oxidativa de lipídios poli-insaturados, a redução de aditivos sintéticos e a veiculação eficiente de micronutrientes lipossolúveis e compostos fenólicos (Christaki *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2022; Sevim; Sanlier, 2024).

Diante do exposto, a revisão tem como objetivo analisar, por meio de revisão narrativa da literatura, a aplicação da β -CD na estabilização de emulsões Pickering, abordando os mecanismos físico-químicos envolvidos, as propriedades tecnológicas resultantes e a capacidade de encapsular ingredientes bioativos para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos. Especificamente, discutem-se: os fundamentos termodinâmicos e os mecanismos moleculares de estabilização interfacial pela β -CD; as propriedades físico-químicas, microestruturais, reológicas e oxidativas resultantes; a capacidade de encapsulação e proteção de compostos bioativos; as aplicações tecnológicas no desenvolvimento de alimentos enriquecidos contribuindo com para a promoção da saúde; e as limitações atuais e as perspectivas para sua incorporação em escala industrial.

2 METODOLOGIA

Trata-se de revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, conduzida conforme a estrutura metodológica descrita por Rother (2007) e Mattos (2015), com o propósito de reunir, organizar e discutir criticamente a produção científica relativa à aplicação da β -CD na estabilização de emulsões Pickering, especificamente analisando a capacidade de encapsulação e proteção de compostos bioativos para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos, com a finalidade de contribuir com a saúde.

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, LILACS e SciELO. Empregaram-se combinações dos descritores “ *β -cyclodextrin*”, “*Pickering emulsion*”, “*interfacial stabilization*”, “*bioactive compounds*”, “*encapsulation*”, “*functional foods*”, “*enriched foods*”, “*oxidative stability*” e “*clean label*”, e seus equivalentes em português, articulados por *AND* e *OR*.

Foram incluídos artigos originais, revisões de literatura, capítulos de livros e documentos de internacionais, publicados preferencialmente entre 2015 e 2025, em consonância com o avanço expressivo da área no último decênio. Consideraram-se também estudos clássicos anteriores a esse período quando essenciais ao suporte teórico (notadamente Ramsden, 1903; Pickering, 1907; Binks e Lumsdon, 2000). Foram excluídos estudos cujo objeto exclusivo fosse a encapsulação por β -CD sem relação direta com sistemas emulsificados, trabalhos fora da área de alimentos e publicações com informações insuficientes sobre mecanismos de estabilização ou sobre a capacidade de proteção de ingredientes bioativos.

A análise foi conduzida de forma descritiva e interpretativa, organizando-se as evidências em eixos temáticos: (a) fundamentos termodinâmicos e mecanísticos da estabilização Pickering; (b) características físico-químicas e microestruturais; (c) propriedades reológicas e texturais; (d) estabilidade oxidativa e capacidade de proteção de compostos bioativos; (e) aplicações tecnológicas no desenvolvimento de alimentos enriquecidos; (f) contribuições para a promoção da saúde; e (g) limitações, desafios industriais e perspectivas futuras.

Durante a preparação deste capítulo, o ChatGPT (OpenAI, GPT 5.6) foi utilizado exclusivamente como ferramenta de apoio à organização textual e ao aprimoramento linguístico da redação. A ferramenta não foi empregada na concepção do estudo, na geração ou análise dos dados, na interpretação dos resultados nem na formulação das conclusões. Todo o conteúdo produzido com seu auxílio foi criticamente revisado e editado pela autora, que assume integral responsabilidade pela exatidão, originalidade e integridade do conteúdo, bem como pela versão final do manuscrito.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

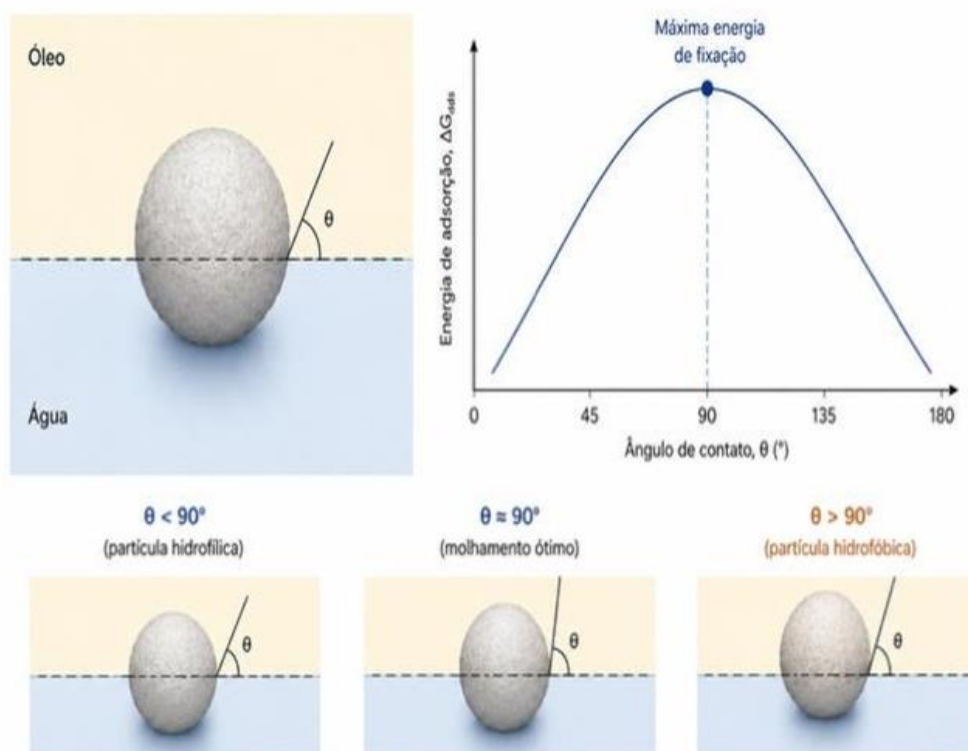
3.1 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS E ESTRUTURAIS DA ESTABILIZAÇÃO PICKERING POR B-CD

As emulsões Pickering articulam entre os princípios termodinâmicos, físico-químicos e estruturais,

os quais, originalmente foram descritos por Ramsden (1903) e Pickering (1907), ao observarem a estabilização de emulsões por partículas sólidas em substituição a tensoativos moleculares. Cerca de um século depois, Binks e Lumsdon (2000) formalizaram o tratamento termodinâmico do processo, demonstrando que a energia necessária para deslocar uma partícula esférica da interface óleo-água é proporcional ao quadrado do raio da partícula, à tensão interfacial e a uma função do ângulo de contato trifásico, expressão que evidencia por que, para partículas essa energia supera em diversas ordens de magnitude a energia térmica ($k_B T$), tornando a adsorção, na teoria, irreversível (Binks, 2002; Tang *et al.*, 2015).

A energia de fixação atinge seu máximo quando o ângulo de contato se aproxima de 90° , condição em que a partícula é igualmente molhada por ambas as fases (Figura 1). Partículas predominantemente hidrofílicas tendem a estabilizar emulsões óleo-em-água, ao passo que partículas mais hidrofóbicas favorecem emulsões água-em-óleo (Binks; Lumsdon, 2000; Hossain *et al.*, 2021).

Figura 1. Relação entre o ângulo de contato e a energia de adsorção de partículas em emulsões Pickering.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A β -CD, por sua estrutura de cone truncado com cavidade interna apolar e bordas externas compostas por grupamentos hidroxila, ocupa nesse panorama posição peculiar. Em sistemas emulsificados, a complexação entre a β -CD e o componente lipídico gera complexos de inclusão (ICs) anfílicos, com solubilidade em água substancialmente reduzida em comparação à β -CD livre (Inoue *et al.*, 2008; Mathapa;

Paunov, 2013).

Esses ICs precipitam *in situ* na forma de microcristais que se ancoram na interface óleo-água, originando as chamadas “emulsões Pickering por microcristais de β -CD” (Kou *et al.*, 2023; Cen *et al.*, 2022), com ângulo de contato tipicamente próximo do ótimo termodinâmico previsto por Binks e Lumsdon (2000).

3.2 MECANISMOS MOLECULARES DE ESTABILIZAÇÃO INTERFACIAL

O mecanismo central das emulsões Pickering reside na adsorção das partículas estabilizantes na interface óleo-água, formando camada física em torno das gotículas dispersas (Pickering, 1907; Chevalier; Bolzinger, 2013). Nas emulsões estabilizadas por β -CD, essa adsorção decorre da formação de microcristais/ICs com componentes lipídicos do óleo, que adquirem caráter anfifílico compatível com a fixação interfacial (Inoue *et al.*, 2008; Kou *et al.*, 2023). Yang *et al.* (2017) e Cen *et al.* (2022) demonstraram, por microscopia confocal e análise de tamanho de partícula, que sistemas óleo-em-água estabilizados por β -CD mantêm índice de polidispersidade e diâmetro médio estáveis ao longo de armazenamento prolongado, com desempenho superior ao de emulsões estabilizadas por Tween 80 ou caseinato. Essa robustez reflete-se, ainda, na resistência a estresses ambientais: emulsões contendo β -CD ou complexos β -CD/celulose catiônica resistem a ciclos térmicos, a variações de força iônica e a cisalhamento intenso (Tian *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024).

A capacidade da β -CD de hospedar moléculas apolares em sua cavidade, com interação regida por forças de van der Waals, hidrofóbicas e, ocasionalmente, ligações de hidrogênio, constitui o ponto de partida de sua atuação como agente Pickering (Astray *et al.*, 2009; Crini, 2014). Óleos vegetais e seus constituintes minoritários atuam como hóspedes naturais, originando ICs menos solúveis em água, que precipitam sob forma de partículas sub-micro a micrométricas (Kou *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024). Essas partículas tendem, a auto-organizar-se formando redes tridimensionais que conectam gotículas vizinhas, fenômeno de bridging interparticular (Kou *et al.*, 2023; Whitby; Wanless, 2016), conferindo às emulsões comportamento reológico de gel fraco, com predominância do módulo elástico sobre o viscoso (Jia *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2022).

Por fim, a camada de partículas de β -CD adsorvida na interface comporta-se como filme protetor que restringe a difusão de oxigênio e de espécies pró-oxidantes em direção ao núcleo lipídico, retardando as etapas de iniciação e propagação da peroxidação (Tian *et al.*, 2022; Suhail *et al.*, 2025). A complexação com tocoferóis, carotenoides e compostos fenólicos pode, ainda, promover a localização interfacial desses antioxidantes, ampliando sua eficácia, efeito conhecido como antioxidant interfacial targeting (Laguerre *et al.*, 2015; Berton-Carabin *et al.*, 2018).

3.3 ESTABILIDADE FÍSICO-QUÍMICA E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A estabilidade cinética constitui atributo central desses sistemas, de acordo com Yang *et al.* (2017) foram observaram acréscimo inferior a 8% no diâmetro de Sauter após 30 dias de armazenamento a 4 °C em emulsões β -CD/óleo de soja, contra acréscimos superiores a 60% em emulsões estabilizadas por Tween 20, resultado corroborado por Kou *et al.* (2023). Sistemas β -CD tendem, também, a apresentar distribuição de tamanho de gotícula mais estreita e índice de polidispersidade inferior a 0,30 (Kou *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Deng *et al.*, 2022), refletindo-se em maior estabilidade ótica e reológica.

O potencial zeta de emulsões β -CD é moderado ($\sim|20-30|$ mV), reforçando a importância da estabilização estérica conferida pela rede interparticular; modificações químicas (carboximetil- β -CD, sulfobutiléter- β -CD) ou associações com biopolímeros aniônicos elevam esse valor para módulos superiores a $|40-50|$ mV, ampliando a robustez eletrostática do sistema (Dong *et al.*, 2021; Cen *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024). Emulsões β -CD/polissacarídeo permanecem estáveis em ampla faixa de pH (4–9) e força iônica (0–500 mM NaCl), enquanto sistemas de β -CD pura apresentam estabilidade reduzida sob condições extremas (Yang *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2024).

A caracterização microestrutural desses sistemas depende de microscopia confocal, eletrônica de varredura e de transmissão, difração de raios-X, Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier e calorimetria diferencial de varredura, essencial para a transposição racional desses sistemas à escala piloto e industrial (Kou *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2015).

3.4 PROPRIEDADES REOLÓGICAS E TEXTURAIS

As emulsões Pickering estabilizadas por β -CD exibem, predominantemente, comportamento pseudoplástico, com tensor de escoamento finito e tixotropia parcial, atributos decorrentes da rede interparticular tridimensional (Tian *et al.*, 2022; Deng *et al.*, 2022). Esse padrão é tecnologicamente desejável em maioneses, molhos e cremes vegetais, por conjugar consistência em repouso e fluidez sob aplicação (Huang *et al.*, 2025; Ferreira de Menezes *et al.*, 2022). Em varredura oscilatória, observa-se recorrentemente a condição $G' > G''$, configurando perfil viscoelástico de gel fraco (Jia *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2024).

Do ponto de vista sensorial, painéis treinados reportam, para maioneses veganas Pickering, percepções de corpo e preenchimento bucal comparáveis às de produtos convencionais com gema de ovo, sobretudo quando a β -CD é combinada com proteínas vegetais ou fibras (Ferreira de Menezes *et al.*, 2022; Taghavi *et al.*, 2024).

3.5 ESTABILIDADE OXIDATIVA EM SISTEMAS LIPÍDICOS VEGETAIS: IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE

A oxidação lipídica constitui uma das principais causas de deterioração de emulsões alimentícias, comprometendo não apenas sabor e aroma, mas também o valor nutricional e a segurança do produto, pela formação de hidroperóxidos, aldeídos e cetonas reativas, compostos associados a efeitos pró-inflamatórios e potencialmente citotóxicos quando ingeridos cronicamente (Berton-Carabin *et al.*, 2014; McClements; Decker, 2018; Hennebelle *et al.*, 2024). Em sistemas *plant-based*, formulados majoritariamente com óleos ricos em ácidos graxos poli-insaturados, esse risco é aumentado pela ausência das estruturas proteicas naturais que, em sistemas lácteos, contribuem para a proteção interfacial.

As emulsões Pickering β -CD têm demonstrado desempenho oxidativo sistematicamente superior, conforme demonstrado por Tian *et al.* (2022) que reportaram redução de 65% no índice de peróxidos após 21 dias de armazenamento em emulsões β -CD/óleo de girassol frente ao controle Tween 80; Kumar *et al.* (2022) e Deng *et al.* (2022) observaram atenuação semelhante na formação de dienos conjugados e TBARS em óleo de linhaça. Do ponto de vista da saúde, essa proteção oxidativa é relevante em dois sentidos, pois preserva a integridade dos ácidos graxos poli-insaturados essenciais (ω -3 e ω -6), cujo valor nutricional depende diretamente de sua forma não oxidada, e reduz a formação de produtos secundários de oxidação lipídica, cuja ingestão continuada tem sido associada a estresse oxidativo sistêmico (Hennebelle *et al.*, 2024; McClements; Decker, 2018).

Adicionalmente, a incorporação de antioxidantes lipofílicos como α -tocoferol, β -caroteno e curcumina em emulsões β -CD mostra-se particularmente eficaz, dado o efeito de localização interfacial desses compostos, que amplia sua disponibilidade na zona reacional crítica (Kou *et al.*, 2023; Suhail *et al.*, 2025). Tal sinergia reforça o duplo papel tecnológico e nutricional da β -CD: estabilizar fisicamente a emulsão e, simultaneamente, otimizar a ação protetora de compostos bioativos com reconhecida atividade antioxidante.

3.6 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS NO DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS ENRIQUECIDOS

As emulsões Pickering β -CD apresentam potencial expressivo como sistemas de veiculação de compostos bioativos lipofílicos como os carotenoides, as vitaminas lipossolúveis, os compostos fenólicos e os ácidos graxos como o ω -3, atendendo a tendência de desenvolvimento de alimentos enriquecidos, funcionais e nutracêuticos (Christaki *et al.*, 2023; Suhail *et al.*, 2025). A dupla funcionalidade da β -CD, como partícula estabilizante de formação de complexos, permite elevada eficiência de encapsulação e modulação da bioacessibilidade gastrointestinal desses compostos (Suhail *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2024).

Em matrizes emulsionadas de base proteica ou lipídica como maioneses, molhos, cremes e sobremesas, a incorporação da β -CD como partícula Pickering resulta em produtos com viscosidade

adequada, índice de cremeação inferior a 10% após 30 dias de armazenamento e cinética oxidativa atenuada, viabilizando a fortificação com ingredientes bioativos sem comprometer a estabilidade sensorial do produto (Taghavi *et al.*, 2024; Ghirro *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2022). Em formulações de base vegetal como as maioneses e queijos plant-based, sobremesas emulsificadas e bebidas vegetais, a β -CD atua adicionalmente como estruturante secundário, conferindo cremosidade sem o teor lipídico das formulações tradicionais e atenuando off-flavors característicos de proteínas de leguminosas, mediante complexação de aldeídos e cetonas responsáveis pelo sabor “beany” (Deng *et al.*, 2022; Sevim; Sanlier, 2024).

Esse conjunto de evidências reforça a versatilidade da β -CD como estratégia tecnológica aplicável a diferentes categorias de alimentos enriquecidos, independentemente da matriz de base, seja láctea, vegetal ou mista, desde que respeitados os parâmetros de formulação que garantem a estabilidade da emulsão e a eficiência de encapsulação do ingrediente bioativo (Suhail *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2024).

3.7 CONTRIBUIÇÕES DA ENCAPSULAÇÃO POR B-CD PARA A QUALIDADE NUTRICIONAL E A PROMOÇÃO DA SAÚDE

A análise integrada da literatura permite consolidar, as contribuições das emulsões Pickering com β -CD para a qualidade nutricional e a promoção da saúde por meio da encapsulação de ingredientes bioativos. Inicialmente, destaca-se a preservação da integridade de compostos suscetíveis à degradação como as vitaminas lipossolúveis, os carotenoides, os compostos fenólicos e os ácidos graxos poli-insaturados, decorrente da barreira oxidativa interfacial discutida anteriormente, o que reduz a exposição do consumidor a produtos secundários de oxidação associados a processos inflamatórios e ao estresse oxidativo (McClements; Decker, 2018; Hennebelle *et al.*, 2024).

Outro aspecto importante é a capacidade da β -CD de formar complexos de inclusão, possibilitando a veiculação protegida de micronutrientes lipossolúveis e compostos fenólicos com reconhecida atividade antioxidante, anti-inflamatória e cardioprotetora, ampliando sua estabilidade durante o processamento, o armazenamento e a digestão gastrointestinal (Christaki *et al.*, 2023; Suhail *et al.*, 2025; Kumar *et al.*, 2022). Dessa forma, esses sistemas representam uma estratégia tecnológica promissora para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos e fortificados, favorecendo a incorporação de ingredientes bioativos em matrizes alimentares e contribuindo para iniciativas de nutrição preventiva, em consonância com a Agenda 2030 das Nações Unidas com Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 3 (ODS 3 – Saúde e Bem-Estar).

Além do exposto, pode-se ainda citar ainda a substituição de emulsificantes sintéticos por partículas de origem alimentar reconhecida como segura como a β -CD, classificada como segura pela *Food and Drug Administration* desde 2001, sendo autorizada a utilizar como aditivo na União Europeia e contemplada pela Resolução RDC nº 239/2018 da Anvisa no Brasil (Anvisa, 2018; Christaki *et al.*, 2023).

atendendo à demanda contemporânea por formulações *clean label*, associada pelo consumidor a menor grau de processamento e a maior percepção de segurança alimentar (Dickinson, 2017; McClements, 2023).

A convergência desses eixos de proteção de compostos bioativos, eficiência de encapsulação e compatibilidade com formulações *clean label*, sustenta a caracterização das emulsões Pickering β -CD como estratégia tecnológica com repercussão direta sobre a promoção da saúde, aplicável a um amplo espectro de matrizes alimentícias e não restrita a uma categoria específica de produto.

3.8 LIMITAÇÕES, DESAFIOS INDUSTRIAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar do robusto corpo de evidências favoráveis, a transposição dessas emulsões à escala industrial enfrenta desafios relevantes. A padronização das formulações é o primeiro deles pois a estabilidade depende da concentração de β -CD, da composição do óleo, da relação óleo-água e dos parâmetros de processamento, e a ausência de protocolos consensuais dificulta a reprodutibilidade entre estudos (Ferreira de Menezes *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2015). A solubilidade limitada da β -CD em água constitui uma segunda limitação, mitigável por modificações químicas (hidroxipropil- β -CD, metil- β -CD) ou associação com biopolímeros (Crini, 2014; Dong *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024). O custo industrial, superior ao de surfactantes convencionais, tende a ser compensado pela eficiência de uso em baixas concentrações e pela funcionalidade dupla de estabilização e de encapsulação (Sevim; Sanlier, 2024).

Do ponto de vista científico, permanecem lacunas relativas à cinética de formação dos microcristais em diferentes matrizes lipídicas, à interação da β -CD com outros componentes alimentares durante o processamento, e à biodisponibilidade *in vivo* dos bioativos veiculados, incluindo possíveis interações com a microbiota intestinal (Christaki *et al.*, 2023; Suhail *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2024). As perspectivas futuras apontam para o uso combinado da β -CD com proteínas vegetais, sua aplicação em emulsões de fase interna alta para substitutos de gordura, a integração com tecnologias de impressão 3D de alimentos e o desenvolvimento de embalagens ativas funcionalizadas com β -CD (Deng *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2025).

4 CONCLUSÃO

As emulsões Pickering estabilizadas com β -ciclodextrina constituem estratégia tecnológica promissora para o desenvolvimento de alimentos enriquecidos com ingredientes bioativos, conciliando estabilidade físico-química, proteção oxidativa e compatibilidade com formulações *clean label*. A fundamentação termodinâmica robusta e o conjunto coerente de mecanismos moleculares, a adsorção, a complexação, a auto-organização, a formação de rede tridimensional e a ação como barreira oxidativa, explicam o desempenho consistentemente superior desses sistemas frente a emulsões convencionais na proteção de compostos suscetíveis à degradação.

Do ponto de vista nutricional, destacam-se a eficiência de encapsulação de vitaminas lipossolúveis, carotenoides, compostos fenólicos e ácidos graxos poli-insaturados, a preservação da qualidade desses ingredientes ao longo do processamento e do armazenamento, e a substituição de emulsificantes sintéticos por partículas reconhecidas como seguras, atributos que, em conjunto, contribuem para a promoção da saúde por meio de alimentos enriquecidos, estáveis e sensorialmente competitivos.

Entretanto, estudos adicionais sobre biodisponibilidade dos compostos encapsulados, escalonamento industrial e validação em diferentes matrizes alimentares ainda são necessários para consolidar a aplicação dessa tecnologia em escala industrial. O aprofundamento das pesquisas mecânicas e das avaliações nutricionais e sensoriais constitui condição necessária para a plena incorporação da β -CD ao portfólio da indústria de alimentos enriquecidos e funcionais da próxima geração.

REFERÊNCIAS

- ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 239, de 26 de julho de 2018: requisitos para uso de aditivos alimentares e coadjuvantes de tecnologia em diversas categorias de alimentos**. Brasília: Diário Oficial da União, 2018.
- ASTRAY, G. *et al.* A review on the use of cyclodextrins in foods. **Food Hydrocolloids**, v. 23, n. 7, p. 1631–1640, 2009. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2009.01.001.
- BERTON-CARABIN, C. C.; ROPERS, M.-H.; GENOT, C. Lipid oxidation in oil-in-water emulsions: involvement of the interfacial layer. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 5, p. 945–977, 2014. DOI: 10.1111/1541-4337.12097.
- BERTON-CARABIN, C. C.; SCHROËN, K. Pickering emulsions for food applications: background, trends, and challenges. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 6, p. 263–297, 2015. DOI: 10.1146/annurev-food-081114-110822.
- BERTON-CARABIN, C. C.; SCHROËN, K. Towards new food emulsions: designing the interface and beyond. **Current Opinion in Food Science**, v. 27, p. 74–81, 2019. DOI: 10.1016/j.cofs.2019.06.006.
- BERTON-CARABIN, C. C.; SAGIS, L.; SCHROËN, K. Formation, structure, and functionality of interfacial layers in food emulsions. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 9, p. 551–587, 2018. DOI: 10.1146/annurev-food-030117-012405.
- BINKS, B. P. Particles as surfactants — similarities and differences. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 7, n. 1-2, p. 21–41, 2002. DOI: 10.1016/S1359-0294(02)00008-0.
- BINKS, B. P.; LUMSDON, S. O. Influence of particle wettability on the type and stability of surfactant - free emulsions. **Langmuir**, v. 16, n. 23, p. 8622–8631, 2000. DOI: 10.1021/la000189s.
- CEN, S. *et al.* 4D printing of a citrus pectin/ β -cyclodextrin Pickering emulsion: a study on temperature induced color transformation. **Additive Manufacturing**, v. 56, art. 102925, 2022. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102925.

CHEVALIER, Y.; BOLZINGER, M.-A. Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 439, p. 23–34, 2013. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.02.054.

CHRISTAKI, S. *et al.* Cyclodextrins for the delivery of bioactive compounds from natural sources: medicinal, food and cosmetics applications. **Pharmaceuticals**, v. 16, n. 9, art. 1274, 2023. DOI: 10.3390/ph16091274.

CRINI, G. Review: a history of cyclodextrins. **Chemical Reviews**, v. 114, n. 21, p. 10940–10975, 2014. DOI: 10.1021/cr500081p.

DENG, W.; LI, Y.; WU, L.; CHEN, S. Pickering emulsions stabilized by polysaccharides particles and their applications: a review. **Food Science and Technology**, v. 42, e24722, 2022. DOI: 10.1590/fst.24722.

DICKINSON, E. Biopolymer-based particles as stabilizing agents for emulsions and foams. **Food Hydrocolloids**, v. 68, p. 219–231, 2017. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.06.024.

DONG, H. *et al.* Pickering emulsion stabilized by hydrophobically modified spherical cellulose nanocrystals with special response to pH. **Research Square**, 2021. Preprint. DOI: 10.21203/rs.3.rs-805075/v1.

FERREIRA DE MENEZES, R. C *et al.* Plant-based mayonnaise: trending ingredients for innovative products. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 30, art. 100599, 2022. DOI: 10.1016/j.ijgfs.2022.100599.

GHIRO, L. C. *et al.* Pickering emulsions stabilized with curcumin-based solid dispersion particles as mayonnaise-like food sauce alternatives. **Molecules**, v. 27, n. 4, art. 1250, 2022. DOI: 10.3390/molecules27041250.

HEI, X. *et al.* Freeze-thaw stability of Pickering emulsion stabilized by modified soy protein particles and its application in plant-based ice cream. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 257, pt. 1, art. 128183, 2024. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128183.

HENNEBELLE, M. *et al.* Lipid oxidation in emulsions: new insights from the past two decades. **Progress in Lipid Research**, v. 94, art. 101275, 2024. DOI: 10.1016/j.plipres.2024.101275.

HOSSAIN, K. M. Z.; DEEMING, L.; EDLER, K. J. Recent progress in Pickering emulsions stabilised by bioderived particles. **RSC Advances**, v. 11, n. 62, p. 39027–39044, 2021. DOI: 10.1039/D1RA08086E.

HUANG, Y.; LI, C.; McCLEMENTS, D. J. Recent advances in plant-based emulsion gels: preparation, characterization, applications, and future perspectives. **Gels**, v. 11, n. 8, art. 641, 2025. DOI: 10.3390/gels11080641.

INOUE, M.; HASHIZAKI, K.; TAGUCHI, H.; SAITO, Y. Formation and characterization of emulsions using β -cyclodextrin as an emulsifier. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin**, v. 56, n. 5, p. 668–671, 2008. DOI: 10.1248/cpb.56.668.

JIA, X.; *et al.* Stabilizing oil-in-water emulsion with amorphous cellulose. **Food Hydrocolloids**, v. 43, p. 275–282, 2015. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2014.05.024.

KOU, X.; ZHANG, X.; KE, Q.; MENG, Q. Pickering emulsions stabilized by β -CD microcrystals: construction and interfacial assembly mechanism. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, art. 1161232, 2023. DOI: 10.3389/fnut.2023.1161232.

KUMAR, A. *et al.* New insights into water-in-oil-in-water (W/O/W) double emulsions: properties, fabrication, instability mechanism, and food applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 128, p. 22–37, 2022. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.07.016.

LAGUERRE, M. *et al.* What makes good antioxidants in lipid-based systems? The next theories beyond the polar paradox. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 2, p. 183–201, 2015. DOI: 10.1080/10408398.2011.650335.

LIU, T. *et al.* Sustained-release mechanism of β -cyclodextrin/cationic cellulose-stabilized Pickering emulsions loaded with citrus essential oil. **Food Chemistry**, v. 460, art. 140674, 2024. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.140674.

LIU, X.; *et al.* Recent advances in plant-based edible emulsion gels for 3D-printed foods. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. 63–79, 2025. DOI: 10.1146/annurev-food-111523-121736.

MATHAPA, B. G.; PAUNOV, V. N. Cyclodextrin stabilised emulsions and cyclodextrinosomes. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 15, n. 41, p. 17903–17914, 2013. DOI: 10.1039/C3CP52116H.

MATTOS, P. C. Tipos de revisão de literatura. **Revista Universitária de Ciências e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 1–9, 2015.

McCLEMENTS, D. J. Ultraprocessed plant-based foods: designing the next generation of healthy and sustainable alternatives to animal-based foods. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 22, n. 5, p. 3531–3559, 2023. DOI: 10.1111/1541-4337.13204.

McCLEMENTS, D. J.; DECKER, E. A. Interfacial antioxidants: a review of natural and synthetic emulsifiers and coemulsifiers that can inhibit lipid oxidation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 1, p. 20–35, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b05066.

PICKERING, S. U. CXCVI.—Emulsions. **Journal of the Chemical Society, Transactions**, v. 91, p. 2001–2021, 1907. DOI: 10.1039/CT9079102001.

RAMSDEN, W. Separation of solids in the surface-layers of solutions and 'suspensions' (observations on surface-membranes, bubbles, emulsions, and mechanical coagulation). **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 72, p. 156–164, 1903. DOI: 10.1098/rspl.1903.0034.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 20, n. 2, p. v–vi, 2007. DOI: 10.1590/S0103-21002007000200001.

SARKAR, A.; DICKINSON, E. Sustainable food-grade Pickering emulsions stabilized by plant-based particles. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 49, p. 69–81, 2020. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.04.004.

SEVIM, S.; SANLIER, N. Cyclodextrin as a singular oligosaccharide: recent advances of health benefit and in food applications. **Journal of Food Science**, v. 89, n. 12, p. 8215–8230, 2024. DOI: 10.1111/1750-3841.17527.

SUHAIL, S.; REHMAN, K.; SHAHID, M.; AKASH, M. S. H. Cyclodextrin-based encapsulation of phenolic compounds. In: MISHRA, M. K. (Ed.). Routledge Resources Online: Polymers, Materials, and Technology. **Boca Raton: CRC Press**, 2025. DOI: 10.1201/9780367694265-EPPMPT94-1.

TAGHAVI, E. *et al.* Rheological and stability of mayonnaise-based Pickering emulsions stabilised by modified rice starch granules as a plant-based emulsifier. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 59, n. 8, p. 5651–5663, 2024. DOI: 10.1111/ijfs.17292.

TANG, J.; QUINLAN, P. J.; TAM, K. C. Stimuli-responsive Pickering emulsions: recent advances and potential applications. **Soft Matter**, v. 11, n. 18, p. 3512–3529, 2015. DOI: 10.1039/C5SM00247H.

TIAN, Y. *et al.* The formation, stabilization and separation of oil-water emulsions: a review. **Processes**, v. 10, n. 4, art. 738, 2022. DOI: 10.3390/pr10040738.

WHITBY, C. P.; WANLESS, E. J. Controlling Pickering emulsion destabilisation: a route to fabricating new materials by phase inversion. **Materials**, v. 9, n. 8, art. 626, 2016. DOI: 10.3390/ma9080626.

YANG, Y. *et al.* An overview of Pickering emulsions: solid-particle materials, classification, morphology, and applications. **Frontiers in Pharmacology**, v. 8, art. 287, 2017. DOI: 10.3389/fphar.2017.00287.

CAPÍTULO 7

TECNOLOGIAS APLICADAS À FORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE NUTRICIONAL

TECHNOLOGIES APPLIED TO FOOD FORTIFICATION AND THEIR IMPACTS ON NUTRITIONAL QUALITY

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-007>

Resumo

A crescente preocupação da população com a saúde, a prevenção de doenças crônicas não transmissíveis e a melhoria da qualidade de vida tem levado a mudanças significativas nos hábitos alimentares e na ciência e tecnologia de alimentos. Nesse contexto, alimentos fortificados tornaram-se importantes alternativas para atender diferentes necessidades nutricionais. O presente estudo teve como objetivo revisar os avanços recentes relacionados às tecnologias aplicadas ao desenvolvimento de alimentos fortificados, abordando os principais métodos de processamento, os efeitos sobre as características físico-químicas, nutricionais, tecnológicas e sensoriais e suas contribuições para a promoção da saúde e da sustentabilidade. Foi realizada uma revisão narrativa, considerando artigos publicados entre 2020 e 2026. A estratégia de busca empregou descritores relacionados à Ciência e Tecnologia de Alimentos, fortificação de alimentos, alimentos funcionais, microencapsulação, fermentação, emulsificação e biofortificação. A análise da literatura demonstrou que diferentes estratégias tecnológicas, como fermentação microbiana, microencapsulação, emulsificação, fortificação vegetal e otimização de formulações por Metodologia de Superfície de Resposta, têm sido empregadas com sucesso para aumentar o valor nutricional dos alimentos sem comprometer sua qualidade sensorial e tecnológica. Os estudos evidenciaram melhorias significativas na estabilidade de vitaminas, compostos fenólicos e carotenoides, maior biodisponibilidade de nutrientes, incremento dos teores de proteínas, fibras e minerais, além da redução de compostos antinutricionais e contaminantes formados durante o processamento, como a acrilamida. Apesar dos avanços, permanecem desafios relacionados à estabilidade de compostos bioativos durante o processamento e armazenamento, às interações entre nutrientes e matriz alimentar e à manutenção da biodisponibilidade.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; Ciência e Tecnologia de Alimentos; Compostos bioativos; Fortificação de alimentos; Sustentabilidade.

Abstract

Growing public concern about health, the prevention of non-communicable chronic diseases, and the improvement of quality of life has driven significant changes in dietary habits and in the field of Food Science and Technology. In this context, fortified foods have emerged as important alternatives for meeting

diverse nutritional needs. This study aimed to review recent advances in technologies applied to the development of fortified foods, focusing on the main processing methods, their effects on physicochemical, nutritional, technological, and sensory characteristics, and their contributions to health promotion and sustainability. A narrative literature review was conducted, considering studies published between 2020 and 2026. The search strategy employed descriptors related to Food Science

Keywords: Bioactive compounds; Food fortification; Food Science and Technology; Functional foods; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A alimentação saudável exerce papel fundamental na promoção da saúde, prevenção de doenças e manutenção da qualidade de vida. Nas últimas décadas, mudanças no perfil epidemiológico da população, associadas ao aumento da incidência de doenças crônicas não transmissíveis, como obesidade, diabetes mellitus, hipertensão arterial e doenças cardiovasculares, impulsionaram a busca por alimentos com melhor qualidade nutricional e por preparações culinárias capazes de atender às novas demandas dos consumidores (Feei *et al.*, 2026; Gupta, Rawal e Arora, 2025). Esse cenário modificou significativamente a atuação da ciência e tecnologia de alimentos, que passou a incorporar conceitos de alimentação saudável, sustentabilidade e inovação tecnológica no desenvolvimento de produtos alimentícios (Brasil, 2014; Willett *et al.*, 2019).

A redução do desperdício de alimentos tornou-se uma das principais prioridades para a construção de sistemas alimentares sustentáveis. Estima-se que aproximadamente um terço dos alimentos produzidos para consumo humano seja desperdiçado ao longo da cadeia produtiva, resultando em impactos negativos na economia e no meio ambiente (FAO, 2019). Aliado a este fato, o aproveitamento integral dos alimentos destaca-se como uma abordagem sustentável na Ciência e Tecnologia de Alimentos, promovendo a utilização de partes tradicionalmente descartadas, como cascas, talos, folhas e sementes, para o desenvolvimento de novos produtos e preparações alimentícias (Boudalia *et al.*, 2026; Zaninelli *et al.*, 2025). Estudos demonstram que subprodutos vegetais apresentam concentrações expressivas de fibras alimentares, compostos fenólicos, carotenoides, vitaminas e minerais, muitas vezes superiores às encontradas nas partes convencionalmente consumidas (Granata *et al.*, 2025; Estivi *et al.*, 2025).

No contexto da ciência e tecnologia de alimentos, a aplicação desses conceitos exige conhecimento técnico acerca do comportamento culinário dos ingredientes, das técnicas de preparo e dos impactos das substituições alimentares sobre as características sensoriais das preparações. A redução de gorduras, açúcares e sódio, a utilização de adoçantes culinários, a incorporação de ingredientes integrais e fortificados e o aproveitamento racional dos alimentos representam estratégias que devem equilibrar qualidade

nutricional, segurança dos alimentos, aceitabilidade sensorial e viabilidade econômica. A adoção dessas estratégias favorece o desenvolvimento de preparações mais saudáveis, sustentáveis e alinhadas às recomendações atuais de alimentação adequada.

Apesar dos avanços observados nas últimas décadas, as informações sobre as tecnologias empregadas na fortificação de alimentos, seus impactos sobre a qualidade dos produtos e suas contribuições para a promoção da saúde e da sustentabilidade permanecem dispersas na literatura científica. Essa condição dificulta a compreensão integrada das diferentes estratégias de processamento disponíveis e de suas aplicações na Ciência e Tecnologia de Alimentos (Picciotti *et al.*, 2022; Darko *et al.*, 2024; Ashraf, 2025). Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo revisar os avanços recentes relacionados às tecnologias aplicadas ao desenvolvimento de alimentos fortificados, destacando os principais métodos de processamento empregados, como fermentação, encapsulação, emulsificação e biofortificação. Especificamente, buscou-se comparar as tecnologias utilizadas, discutir seus efeitos sobre as características físico-químicas, nutricionais, tecnológicas e sensoriais dos alimentos e analisar suas contribuições para a promoção da saúde, a inovação tecnológica e a sustentabilidade dos sistemas alimentares.

2 METODOLOGIA

Foram avaliados artigos publicados entre os anos de 2020 e 2026, nas bases de dados *ScienceDirect*, *PubMed* e *LILACS*. A busca inicial ocorreu empregando-se o operador booleano *and* entre os descritores: *Food Technology*, *Food Science*, *Whole Grain Foods*, *Fortified Foods*, *Food Fortification*, *Functional Foods*, *Food Processing*, *Food Innovation*, *Nanoencapsulation*, *Microencapsulation*, *Fermentation*, *Emulsification* e *Biofortification*. Também foram realizadas buscas específicas para tecnologias emergentes aplicadas à fortificação de alimentos, utilizando combinações entre os descritores *Fortified Foods and Nanoencapsulation*; *Fortified Foods and Fermentation*; *Fortified Foods and Functional Ingredients*; e *Food Technology and Healthy Foods*.

Inicialmente, os estudos foram selecionados por meio da leitura dos títulos e resumos. Foram considerados elegíveis os artigos que abordassem pelo menos um dos seguintes aspectos: (i) desenvolvimento ou reformulação de alimentos fortificados; (ii) aplicação de tecnologias de processamento, como fermentação, encapsulação, emulsificação, biofortificação ou outras estratégias de fortificação de alimentos; (iii) avaliação das características físico-químicas, nutricionais, tecnológicas e/ou sensoriais dos produtos desenvolvidos; e (iv) estudos relacionados à utilização de ingredientes naturais, compostos bioativos ou subprodutos agroindustriais no desenvolvimento de alimentos funcionais. Foram adotados como critérios de inclusão: (a) artigos originais publicados em periódicos científicos indexados; (b) textos completos disponíveis em português ou inglês; (c) estudos publicados entre 2021 e 2026; e (d) trabalhos que apresentassem descrição metodológica suficiente para análise dos resultados. Como critérios

de exclusão, foram considerados: (a) artigos de revisão, editoriais, resumos de congressos, capítulos de livros e patentes; (b) estudos duplicados entre as bases consultadas; (c) publicações sem acesso ao texto completo; e (d) trabalhos que não apresentassem relação direta com o desenvolvimento tecnológico de alimentos fortificados.

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, os artigos selecionados foram lidos integralmente e organizados em planilhas eletrônicas para extração das seguintes informações: autores, ano de publicação, objetivo, metodologia empregada, tecnologia de processamento utilizada, características físico-químicas, nutricionais, tecnológicas e sensoriais avaliadas, além dos principais resultados. Posteriormente, os estudos foram agrupados de acordo com a tecnologia empregada e utilizados na elaboração da discussão, permitindo comparar as diferentes estratégias de fortificação e suas contribuições para a Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Declaração de uso de Inteligência Artificial: Durante a preparação deste manuscrito, a autora utilizou as ferramentas de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) e SciSpace como apoio ao processo de elaboração do trabalho. O ChatGPT foi empregado para auxiliar na organização da estrutura do manuscrito, aprimoramento da redação científica, revisão gramatical, tradução do resumo para o inglês e sugestões de coesão e clareza textual. O SciSpace foi utilizado durante a fase de revisão da literatura para auxiliar na leitura de artigos científicos, compreensão do conteúdo e identificação de referências relevantes. Todo o conteúdo gerado ou auxiliado por essas ferramentas foi cuidadosamente revisado, editado e validado pela autora, que assume integral responsabilidade pela originalidade, exatidão, interpretação e veracidade das informações apresentadas neste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 1. Características físico-químicas, nutricionais e sensoriais de produtos fortificados.

Referência	Objetivo	Metodologia	Principais resultados das características físico-químicas, nutricionais e sensoriais
Granata, G. et al. <i>High vitamin E-loaded nanocapsules to fortify a fruit-based product. Food Bioscience</i> , v. 64, 2025.	Desenvolver nanocápsulas contendo vitamina E para fortificação de um produto à base de frutas.	Produção de nanocápsulas de policaprolactona, caracterização físico-química e incorporação em picolé de frutas, seguida de avaliação da estabilidade durante o armazenamento.	As nanocápsulas apresentaram 100% de eficiência de encapsulação, elevada estabilidade físico-química e maior retenção de vitamina E durante o processamento e armazenamento, preservando a atividade antioxidante do produto.
Estivi, L. et al. <i>By-product of green pea canning as a substrate for Propionibacterium freudenreichii fermentation to fortify bread with vitamin B12. Future Foods</i> , v. 12, 2025.	Produzir vitamina B12 utilizando subproduto da indústria de ervilhas para fortificação de pão.	Fermentação do subproduto com Propionibacterium freudenreichii, seguida da incorporação da biomassa ao pão e avaliação nutricional e tecnológica.	O pão fortificado apresentou elevado teor de vitamina B12, mantendo qualidade tecnológica, textura e aceitabilidade, demonstrando o potencial da fermentação como estratégia sustentável.

Referência	Objetivo	Metodologia	Principais resultados das características físico-químicas, nutricionais e sensoriais
Rahman, T. et al. <i>Nutritional enhancement, antinutrient reduction, sensory quality, and acrylamide mitigation in biscuits fortified with oil-assisted debittered Moringa oleifera leaf powder. Future Foods</i> , v. 13, 2026.	Desenvolver biscoitos fortificados com folhas de Moringa oleifera.	Produção de biscoitos contendo diferentes níveis de moringa e avaliação físico-química, nutricional, sensorial e de estabilidade.	Houve aumento dos teores de proteínas, fibras, ferro e cálcio, redução de compostos antinutricionais e da formação de acrilamida, mantendo adequada aceitação sensorial.
Kaur, N. et al. <i>Optimisation of biscuits fortified with underutilised iron-rich plant sources. LWT – Food Science and Technology</i> , v. 248, 2026.	Desenvolver biscoitos enriquecidos com fontes vegetais ricas em ferro.	Otimização da formulação por Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) e avaliações físico-químicas, estruturais e sensoriais.	A formulação otimizada aumentou em aproximadamente 26% o teor de ferro, mantendo elevada aceitabilidade sensorial e boas propriedades tecnológicas.
Wang, Y. et al. <i>Recent developments, challenges, and prospects of dietary omega-3 PUFA-fortified foods: Focusing on their effects on Cardiovascular diseases. Food Chemistry</i> , 2024.	Revisar tecnologias utilizadas na fortificação de alimentos com ácidos graxos ômega-3.	Revisão da literatura sobre encapsulação, estabilidade, biodisponibilidade e aplicações industriais.	As tecnologias de micro e nanoencapsulação aumentaram a estabilidade oxidativa, a biodisponibilidade e a preservação das características sensoriais dos alimentos enriquecidos com ômega-3.
Khan, M. et al. <i>Formulation and characterization of concentrated black cumin seed oil-fortified yogurt for modulating glucose indices. Applied Food Research</i> , v. 6, 2026.	Desenvolver iogurte funcional enriquecido com óleo de cominho-preto.	Formulação de emulsões óleo/água, incorporação ao iogurte e avaliações físico-químicas, antioxidantes e sensoriais.	O produto apresentou maior atividade antioxidante e potencial hipoglicemiante, mantendo estabilidade físico-química e elevada aceitação sensorial.
Khan, S. et al. <i>Physicochemical stability, bioactive retention, and sensory quality of functional milk drink fortified with saffron and aloe vera gel. Applied Food Research</i> , v. 6, 2026.	Desenvolver bebida láctea funcional enriquecida com açafrão e Aloe vera.	Avaliações físico-químicas, microbiológicas, antioxidantes e sensoriais durante o armazenamento refrigerado.	A cofortificação aumentou a estabilidade, a retenção de compostos bioativos e a aceitação sensorial, preservando a qualidade microbiológica da bebida.
Pérez-Alva, A. et al. <i>Bioactive compounds in colored maize (Zea mays L.) tortillas fortified with Macrocytis pyrifera. Applied Food Research</i> , v. 6, 2026.	Avaliar a fortificação de tortilhas de milho colorido com Macrocytis pyrifera.	Produção das tortilhas e quantificação de compostos bioativos por LC-MS/MS.	A fortificação aumentou significativamente os teores de carotenoides e compostos fenólicos, enriquecendo o perfil funcional do produto sem comprometer suas características tecnológicas.

Fonte: a autora, 2026.

Os avanços recentes da Ciência e Tecnologia de Alimentos têm ampliado significativamente as estratégias para o desenvolvimento de alimentos fortificados, priorizando a melhoria do valor nutricional sem comprometer as propriedades tecnológicas e sensoriais dos produtos (Edkaidek *et al.*, 2026). A análise conjunta dos estudos demonstra que, independentemente da matriz alimentar empregada, todos tiveram como objetivo comum aumentar a densidade nutricional dos alimentos, preservando sua estabilidade físico-química, qualidade sensorial e viabilidade tecnológica. Para isso, foram empregadas diferentes estratégias de processamento, como fermentação, nanoencapsulação, microencapsulação, emulsificação, fortificação vegetal, cofortificação e otimização de formulações por *Response Surface Methodology* (Sawant *et al.*, 2025). Embora distintas, essas tecnologias convergem para um mesmo propósito: maximizar a retenção de nutrientes durante o processamento e armazenamento, aumentar a biodisponibilidade de compostos

bioativos e desenvolver produtos capazes de atender às atuais demandas por alimentos mais saudáveis, seguros e sustentáveis (FAO; WHO, 2006; Wang *et al.*, 2024). Entre as tecnologias avaliadas, a fermentação destacou-se como uma alternativa sustentável para produção de micronutrientes e valorização de coprodutos agroindustriais. Estivi *et al.* (2025) utilizaram resíduos da indústria de processamento de ervilhas como substrato para fermentação com *Propionibacterium freudenreichii*, obtendo elevada produção de vitamina B12 destinada à fortificação de pães, sem prejuízo às características tecnológicas do produto final. Além de contribuir para a produção de alimentos enriquecidos, essa abordagem demonstra o potencial da fermentação na redução do desperdício de alimentos e na agregação de valor a subprodutos agroindustriais, em consonância com os princípios da economia circular (Gonçalves, Pestana e Alvarenga., 2026).

Outra estratégia amplamente explorada consiste na utilização de ingredientes vegetais como fontes naturais de nutrientes e compostos bioativos. Rahman *et al.* (2026) verificaram que a incorporação de folhas de *Moringa oleifera* previamente desamargadas promoveu aumento significativo dos teores de proteínas, fibras, ferro e cálcio em biscoitos, além de reduzir compostos antinutricionais e a formação de acrilamida durante o processamento térmico. Resultados semelhantes foram observados por Kaur *et al.* (2026), que empregaram amaranto, moringa e sementes de agrião para desenvolver biscoitos enriquecidos com ferro, utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta para otimizar a formulação. Os autores relataram incremento aproximado de 26% no teor de ferro, associado à elevada aceitação sensorial, evidenciando que a otimização estatística permite melhorar simultaneamente a qualidade nutricional e tecnológica dos produtos.

A incorporação de ingredientes naturais em alimentos tradicionais também tem se destacado como uma estratégia promissora para agregar valor nutricional e funcional sem descaracterizar produtos amplamente aceitos pelos consumidores. Pérez-Alva *et al.* (2026) demonstraram que a fortificação de tortilhas elaboradas com milho colorido utilizando a macroalga *Macrocystis pyrifera* promoveu aumento significativo dos teores de carotenoides e compostos fenólicos, evidenciando o potencial das macroalgas como fontes naturais de compostos bioativos para alimentos funcionais. Esses resultados corroboram a tendência de valorização de ingredientes naturais na reformulação de alimentos tradicionais, ampliando as possibilidades de diversificação das matérias-primas empregadas pela indústria de alimentos. De maneira geral, alimentos tradicionais são produzidos a partir de matérias-primas locais e métodos de preparo transmitidos ao longo de gerações, apresentando menor dependência de aditivos artificiais quando comparados aos alimentos altamente processados. Nesse contexto, os ingredientes naturais exercem funções que vão além da composição da receita, contribuindo para as características sensoriais, a conservação, a identidade cultural e, em muitos casos, para o aumento do valor nutricional e funcional dos alimentos (Kurniahu, Andriani e Rahmawati., 2023; Aggarwal, Kathuria e Singh., 2025).

Além da fortificação com ingredientes vegetais, tecnologias de encapsulação vêm sendo

amplamente empregadas para proteger nutrientes sensíveis ao processamento industrial. Wang *et al.* (2024), em revisão sobre alimentos enriquecidos com ácidos graxos ômega-3, destacaram que processos de microencapsulação e nanoencapsulação aumentam significativamente a estabilidade oxidativa, preservam as características sensoriais e favorecem a biodisponibilidade desses compostos durante o armazenamento. Resultados semelhantes foram obtidos por Granata *et al.* (2025), que desenvolveram nanocápsulas biodegradáveis contendo α -tocoferol para fortificação de um produto à base de frutas. Os autores observaram eficiência de encapsulação de 100%, elevada estabilidade físico-química e maior retenção da vitamina durante o processamento e armazenamento quando comparada à vitamina livre, evidenciando o potencial da nanoencapsulação para aplicação industrial em alimentos funcionais e fortificados.

Os estudos também demonstram crescente interesse pela incorporação de compostos bioativos em produtos lácteos. Khan, M. *et al.* (2026) desenvolveram um iogurte funcional enriquecido com óleo de *Nigella sativa*, utilizando emulsões estabilizadas por proteínas do soro do leite. O produto apresentou maior atividade antioxidante e potencial hipoglicemiante, mantendo adequada estabilidade físico-química e elevada aceitação sensorial. Em estudo complementar, Khan, S. *et al.* (2026) avaliaram a cofortificação de bebida láctea contendo gel de *Aloe vera* e açafrão (*Crocus sativus*), verificando maior retenção de compostos bioativos, estabilidade microbiológica e qualidade sensorial durante o armazenamento refrigerado. Esses resultados corroboram com Shishir *et al.* (2026) reforçando que sistemas emulsificados e cofortificação constituem estratégias promissoras para aumentar o valor funcional de produtos lácteos sem comprometer sua estabilidade tecnológica.

Embora empreguem tecnologias distintas, todos os estudos apresentaram metodologia semelhante para avaliação da qualidade dos alimentos desenvolvidos. As análises envolveram parâmetros físico-químicos, como composição centesimal, teor de vitaminas e minerais, compostos fenólicos, carotenoides, atividade antioxidante, estabilidade oxidativa e tamanho de partículas, complementados por avaliações tecnológicas de textura, cor, rendimento do processamento, estabilidade durante o armazenamento, comportamento reológico, sinérese e capacidade de retenção de água. Na maioria dos trabalhos, análises sensoriais também foram realizadas para determinar a aceitação dos consumidores quanto à aparência, aroma, sabor, textura e impressão global, demonstrando que a incorporação de ingredientes funcionais pode ocorrer sem prejuízo da qualidade sensorial quando a formulação e o processamento são adequadamente planejados.

Sob a perspectiva da Ciência e Tecnologia de Alimentos, os resultados obtidos confirmam que as modificações promovidas durante o processamento envolvem alterações físicas, químicas, microbiológicas e sensoriais capazes de influenciar diretamente a qualidade final dos alimentos. Conforme descrito por Philippi (2019), os processos tecnológicos devem ser avaliados não apenas pelo rendimento industrial, mas também pela capacidade de melhorar o valor nutricional, aumentar a digestibilidade e a palatabilidade,

inibir o crescimento de microrganismos patogênicos e minimizar a formação de substâncias potencialmente prejudiciais à saúde. Os estudos analisados corroboram essa abordagem, uma vez que demonstraram aumento do conteúdo de proteínas, fibras, vitaminas, minerais e antioxidantes, redução de compostos antinutricionais e contaminantes de processo, maior estabilidade dos nutrientes durante o armazenamento e manutenção da qualidade sensorial dos produtos.

No entanto, do ponto de vista industrial, a adoção dessas tecnologias deve considerar não apenas os benefícios nutricionais, mas também aspectos relacionados à viabilidade econômica, disponibilidade das matérias-primas, facilidade de processamento, legislação vigente e aceitação pelos consumidores. Ingredientes naturais provenientes de subprodutos agroindustriais apresentam elevado potencial para aplicação comercial devido ao baixo custo e à contribuição para a sustentabilidade da cadeia produtiva (Darko *et al.*, 2024; Boudalia *et al.*, 2026). Entretanto, tecnologias mais complexas, como nanoencapsulação e microencapsulação, embora proporcionem maior proteção aos compostos bioativos, ainda apresentam custos de produção relativamente elevados, o que pode limitar sua utilização em determinados segmentos da indústria alimentícia. Dessa forma, a escolha da estratégia de fortificação deve considerar simultaneamente eficiência tecnológica, custo-benefício e potencial de aplicação comercial.

As tendências atuais indicam que o desenvolvimento de alimentos fortificados deverá evoluir para sistemas cada vez mais personalizados e sustentáveis, integrando ingredientes naturais, processos biotecnológicos e tecnologias emergentes de encapsulação. O avanço da biofortificação, da fermentação de precisão, da nanotecnologia e da utilização de coprodutos agroindustriais poderá ampliar significativamente a oferta de alimentos funcionais capazes de atender às demandas nutricionais da população sem comprometer a qualidade sensorial dos produtos. Além disso, a incorporação de ferramentas de inteligência artificial, modelagem estatística e otimização de processos tende a acelerar o desenvolvimento de formulações mais eficientes, fortalecendo o papel da Ciência e Tecnologia de Alimentos na promoção da saúde pública, da segurança alimentar e da sustentabilidade dos sistemas de produção (Dahiya *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2024; Kuhl, 2025).

Apesar dos resultados promissores observados nos estudos analisados, algumas limitações ainda restringem a ampla aplicação dessas tecnologias em escala industrial. A maior parte das pesquisas foi conduzida em condições laboratoriais ou em escala piloto, havendo escassez de estudos que avaliem o desempenho tecnológico, a estabilidade dos nutrientes e a aceitação sensorial durante a produção em larga escala. Além disso, poucos trabalhos investigaram a biodisponibilidade dos nutrientes após o consumo ou realizaram estudos clínicos capazes de confirmar os benefícios nutricionais observados nas análises laboratoriais. Esses aspectos evidenciam a necessidade de pesquisas que integrem desenvolvimento tecnológico, avaliação nutricional e validação clínica, permitindo consolidar o uso dessas tecnologias na indústria de alimentos (Ashraf, 2025; Cashman, 2024; Edkaidek *et al.*, 2026).

4 CONCLUSÃO

A fortificação dos alimentos mostrou-se uma estratégia complementar de grande relevância, proporcionando redução do desperdício, valorização nutricional das preparações e diminuição dos impactos ambientais decorrentes do descarte de resíduos alimentares. No entanto, ainda apresenta desafios relacionados à estabilidade dos nutrientes, às interações entre compostos bioativos e a matriz alimentar e à manutenção da biodisponibilidade após o processamento industrial. Vitaminas lipossolúveis, carotenoides e ácidos graxos poli-insaturados permanecem particularmente suscetíveis à oxidação, enquanto minerais podem formar complexos com proteínas, fibras e fitatos, reduzindo sua absorção pelo organismo. Dessa forma, a escolha da tecnologia de incorporação, das condições de processamento e da matriz alimentar continua sendo determinante para o sucesso dos alimentos fortificados.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, S.; KATHURIA, D.; SINGH, N. Nutritional and health promoting properties of traditional regional foods: Harnessing omics techniques for microbial and metabolite identification. **Journal of Functional Foods**, v. 130, 2025.
- ASHRAF, S. A. Food fortification as a sustainable global strategy to mitigate micronutrient deficiencies and improve public health. **Discover Food**, v. 5, 2025.
- BOUDALIA, S.; SYMEON, G. K.; DOTAS, V.; GUEBOUDJI, Z.; KOUADRI, I.; SEHILI, B.; TERFA, M. T.; SMETI, S.; GUEROUI, Y.; BOUSBIA, A. The valorization of agrifood byproducts and waste to advance the Sustainable Development Goals: Current state and new perspectives. **Sustainability**, v. 18, 2026
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Guia alimentar para a população brasileira**. 2. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2014.
- CASHMAN, K. D. Vitamin D fortification of foods: sensory, acceptability, cost, and public acceptance considerations. **The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology**, v. 239, art. 106494, 2024.
- DAHIYA, D.; TERPOU, A.; DASENAKI, M.; NIGAM, P. S. Current status and future prospects of bioactive molecules delivered through sustainable encapsulation techniques for food fortification. **Sustainable Food Technology**, v. 1, p. 500-510, 2023.
- DARKO, H. S. O.; ISMAIEL, L.; FANESI, B.; PACETTI, D.; LUCCI, P. Current trends in food processing by-products as sources of high value-added compounds in food fortification. **Foods**, v. 13, 2024.
- EDKAIDEK, H.; DAHIYA, D.; NIGAM, P. S. Prospects of bioactive compounds in designing functional foods: Challenges and solutions. **Foods**, v. 15, 2026.
- ESTIVI, L. *et al.* By-product of green pea canning as a substrate for *Propionibacterium freudenreichii* fermentation to fortify bread with vitamin B12. **Future Foods**, v. 12, 2025.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

FAO; WHO. **Guidelines on Food Fortification with Micronutrients**. Geneva: World Health Organization; Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

FEEL, Z.; LIU, S.; FU, C.; ZHOU, S.; LEE, Y. Y. Functional foods in health promotion and disease prevention: Innovations, evidence and challenges. **Foods**, v. 15, 2026.

GONÇALVES, E. M.; PESTANA, J.; ALVARENGA, N. Fermenting the unused: Microbial biotransformation of food industry by-products for circular bioeconomy valorisation. **Fermentation**, v. 12, 2026.

GRANATA, G.; ACCARDO, P.; CONSOLI, G. M. L.; PARADISI, R.; GERACI, C. High vitamin E-loaded nanocapsules to fortify a fruit-based product. **Food Bioscience**, v. 64, art. 105884, 2025.

GUPTA, S. K.; RAWAL, T.; ARORA, M. Healthy choices, healthy futures: Promoting healthy nutrition to curb non-communicable diseases. **Trends in Endocrinology & Metabolism**, v. 36, n. 6, p. 497-501, 2025.

KAUR, N. *et al.* Optimisation of biscuits fortified with underutilised iron-rich plant sources. **LWT – Food Science and Technology**, v. 248, 2026.

KHAN, M. *et al.* Formulation and characterization of concentrated black cumin seed oil-fortified yogurt for modulating glucose indices. **Applied Food Research**, v. 6, 2026.

KHAN, S. *et al.* Physicochemical stability, bioactive retention, and sensory quality of functional milk drink fortified with saffron and aloe vera gel. **Applied Food Research**, v. 6, 2026.

KUHL, E. AI for food: accelerating and democratizing discovery and innovation. **npj Science of Food**, v. 9, 2025.

KUMAR, A. *et al.* Recent trends in the encapsulation of functional lipids: comprehensive review. **Sustainable Food Technology**, v. 2, 2024.

KURNIAHU, H.; ANDRIANI, R.; RAHMAWATI, A. Ethnobotany of traditional food ingredients in Tuban Regency, East Java. **Jurnal Pembelajaran dan Biologia Nukleus**, v. 9, n. 2, 2023.

PÉREZ-ALVA, A. *et al.* Bioactive compounds in colored maize (*Zea mays* L.) tortillas fortified with *Macrocystis pyrifera*. **Applied Food Research**, v. 6, 2026.

PHILIPPI, S. T. **Nutrição e técnica dietética**. 3. ed. Barueri: Manole, 2019.

PICCIOTTI, U.; MASSARO, A.; GALIANO, A.; GARGANESE, F. Cheese fortification: Review and possible improvements. **Food Reviews International**, v. 38, p. 474-500, 2022.

RAHMAN, T. *et al.* Nutritional enhancement, antinutrient reduction, sensory quality, and acrylamide mitigation in biscuits fortified with oil-assisted debittered *Moringa oleifera* leaf powder. **Future Foods**, v. 13, 2026.

SAWANT, S. S.; PARK, H.-Y.; SIM, E.-Y.; KIM, H.-S.; CHOI, H.-S. Microbial fermentation in food: Impact on functional properties and nutritional enhancement—A review of recent developments. **Fermentation**, v. 11, n. 1, 2025.

SHISHIR, M. R. I.; KHAN, S.; KARIM, N. *et al.* New frontiers in beverage fortification: Delivery of functional ingredients via micro- and nanoencapsulation in dairy and non-dairy beverages. **Food Research International**, v. 230, art. 118607, 2026.

WANG, Y. *et al.* Recent developments, challenges, and prospects of dietary omega-3 PUFA-fortified foods: Focusing on their effects on cardiovascular diseases. **Food Chemistry**, 2024.

WILLETT, W. *et al.* Food in the Anthropocene: The EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. **The Lancet**, v. 393, n. 10170, p. 447-492, 2019.

ZANINELLI, K. *et al.* Sensory evaluation and characterization of breakfast cereal formulated with yam flour (*Dioscorea cayanensis* Lam). **Food Science and Technology**, v. 45, 2025.

CAPÍTULO 8

UTILIZAÇÃO DE SEMENTES GERMINADAS E DO PROCESSO DE EXTRUSÃO COMO ALIADOS NO AVANÇO TECNOLÓGICO EM PSEUDOCEREAIS E LEGUMINOSAS

THE USE OF GERMINATED SEEDS AND THE EXTRUSION PROCESS AS TOOLS FOR TECHNOLOGICAL ADVANCEMENT IN PSEUDOCEREALS AND LEGUMES

 <https://doi.org/10.63330/livroautor822026-008>

Resumo

Este capítulo analisa a integração da germinação de grãos e do processo de extrusão como uma estratégia tecnológica avançada para potencializar o valor nutricional e funcional de pseudocereais e leguminosas. A germinação atua como um pré-tratamento bioquímico que ativa enzimas endógenas (amilases, proteases e fitases), promovendo a redução de antinutrientes, como o ácido fítico e inibidores de tripsina, além de elevar os teores de aminoácidos essenciais (lisina e triptofano), fibras solúveis e GABA. A extrusão complementa essa ação ao inativar antinutrientes remanescentes e gelatinizar o amido. Contudo, a adição de farinhas germinadas ricas em fibras e proteínas pode reduzir a razão de expansão do extrusado e aumentar a dureza dos produtos devido ao rompimento das células de ar na matriz do equipamento. Do ponto de vista funcional, a sinergia entre os processos altera a microestrutura, aumentando o amido de digestão lenta para 10,56% em extrusados de tremoço, o que contribui para um menor índice glicêmico. A digestibilidade proteica é otimizada para níveis próximos aos da caseína, resultado de mudanças estruturais que facilitam o acesso enzimático. Adicionalmente, observou-se um aumento expressivo na inibição das enzimas α -glucosidase (221%) e α -amilase (105%) no milho integral, reforçando o potencial antidiabético da tecnologia. A combinação desses métodos demonstra ser uma via robusta para a produção de alimentos funcionais com alto valor agregado. Como sugestão para estudos futuros temos a otimização sensorial para equilibrar a aceitabilidade (crocância e dureza) com o perfil nutricional superior dos extrusados estudados, a realização de ensaios clínicos (*in vivo*) para validar as propriedades hipoglicêmicas e hipotensoras observadas nos testes *in vitro* e avaliações de estabilidade de prateleira e preservação de compostos bioativos durante o armazenamento destes novos produtos.

Palavras-chave: Alimentos funcionais e bioativos; Extrusão de grãos germinados; Gelatinização do amido; Pseudocereais extrusados; Redução de antinutrientes.

Abstract

This chapter analyzes the integration of grain germination and the extrusion process as an advanced technological strategy to enhance the nutritional and functional value of pseudocereals and legumes. Germination acts as a biochemical pretreatment that activates endogenous enzymes (amylases, proteases,

and phytases), promoting the reduction of antinutrients such as phytic acid and trypsin inhibitors, while also increasing the levels of essential amino acids (lysine and tryptophan), soluble fiber, and GABA. Extrusion complements this action by inactivating remaining antinutrients and gelatinizing the starch. However, the addition of sprouted flours rich in fiber and protein can reduce the expansion ratio of the extrudate and increase the hardness of the products due to the rupture of air cells in the equipment matrix. From a functional standpoint, the synergy between the processes alters the microstructure, increasing slow-digesting starch to 10.56% in lupin extrudates, which contributes to a lower glycemic index. Protein digestibility is optimized to levels close to those of casein, a result of structural changes that facilitate enzymatic access. Additionally, a significant increase in the inhibition of α -glucosidase (221%) and α -amylase (105%) enzymes was observed in whole corn, reinforcing the technology's antidiabetic potential. The combination of these methods has proven to be a robust approach for producing functional foods with high added value. As a suggestion for future studies, we propose sensory optimization to balance acceptability (crunchiness and hardness) with the superior nutritional profile of the extruded products studied, conducting clinical trials (in vivo) to validate the hypoglycemic and antihypertensive properties observed in in vitro tests, and evaluating the shelf life and preservation of bioactive compounds during storage of these new products.

Palavras-chave: Extruded pseudocereals; Extrusion of sprouted grains; Functional and bioactive foods; Reduction of antinutrients; Starch gelatinization.

1 INTRODUÇÃO

Produtos extrusados desempenham um papel fundamental na nutrição moderna, oferecendo uma combinação única de versatilidade, conveniência, valor nutricional e oportunidades de inovação na indústria de alimentos (Muñoz-Llandes et al., 2024). Um dos polissacarídeos mais comumente utilizados no desenvolvimento desses produtos é o amido. Durante o processamento do amido, polímeros não amiláceos, como lipídios, fibras e proteínas, interagem com as moléculas de amido, alterando sua estrutura e funcionalidade. Essa interação modifica significativamente a digestibilidade deste polissacarídeo (Muñoz-Llandes et al., 2024).

A incorporação de fontes proteicas, especialmente leguminosas e pseudocereais, tem sido uma estratégia eficaz para melhorar o perfil nutricional de snacks expandidos obtidos pelo processo de inibidores de tripsina, taninos e ácido fítico, que limitam a biodisponibilidade de nutrientes (Nongmaithem et al., 2024). Para superar tais limitações, a combinação da germinação um processo biológico com a extrusão termoplástica um processo termomecânico de alta temperatura e curto tempo (HTST) surge como uma alternativa tecnológica promissora (Gong et al., 2018; Nongmaithem et al., 2024). Este capítulo explora

como essa sinergia transforma as propriedades tecno-funcionais e o potencial bioativo de alimentos de base vegetal.

2 GERMINAÇÃO COMO PRÉ-TRATAMENTO BIOQUÍMICO

A germinação é sugerida como uma forma econômica e eficaz de melhorar a qualidade nutricional de cereais, pseudocereais e leguminosas (Gong *et al.*, 2018). Durante a germinação, ocorre a ativação de sistemas enzimáticos endógenos (amilases, proteases e fitases), resultando na hidrólise de macromoléculas (Gong *et al.*, 2018).

Estudos com milho integral demonstram que a germinação eleva o conteúdo de aminoácidos essenciais limitantes, como lisina e triptofano, além de aumentar a fibra alimentar solúvel (Gong *et al.*, 2018). Em leguminosas como o tremoço (*Lupinus angustifolius*), o processo reduz significativamente o conteúdo de ácido fítico e inativa inibidores de tripsina (Muñoz-Llandes *et al.*, 2023). Além disso, a germinação é reconhecida por aumentar a síntese de ácido gama-aminobutírico (GABA), um neurotransmissor com funções neuroprotetoras e hipotensoras, conforme observado em pesquisas recentes em variedades de arroz pigmentado (Itthivadhanapong *et al.*, 2026).

3 O PROCESSO DE EXTRUSÃO E INTERAÇÕES MOLECULARES

A extrusão combina operações unitárias de mistura, cisalhamento, aquecimento e moldagem (Nongmaithem *et al.*, 2024). O amido, componente principal, sofre gelatinização e dextrinização, o que facilita a expansão do produto final (Nongmaithem *et al.*, 2024). Entretanto, a adição de proteínas e fibras provenientes de leguminosas germinadas pode alterar a formação da matriz.

3.1 PROPRIEDADES DE EXPANSÃO E TEXTURA

A razão de expansão (ER) é influenciada pela natureza multifásica da massa fundida na extrusora (Itthivadhanapong *et al.*, 2026). A adição de farinhas de leguminosas germinadas tende a reduzir a expansão e aumentar a dureza destes produtos (Adebayo & Oladunjoye, 2024; Itthivadhanapong *et al.*, 2026). Isso ocorre porque o alto teor de proteínas e fibras pode romper as paredes das células de ar, limitando o crescimento das bolhas de vapor d'água na saída da matriz (Nongmaithem *et al.*, 2024). Em extrusados de sorgo e feijão-fava germinado, observou-se que o aumento da proporção da leguminosa reduziu a crocância e a luminosidade (L^*) do produto (Adebayo & Oladunjoye, 2024).

3.2 MICROESTRUTURA E CRISTALINIDADE

A análise por espectroscopia no infravermelho (FTIR) e difração de raios X (XRD) revela mudanças profundas na organização molecular. Em extrusados de tremoço germinado, a cristalinidade relativa

aumentou significativamente em comparação com amostras não germinadas (Muñoz-Llandes et al., 2024). A germinação promove a hidrólise parcial de proteínas, que durante a extrusão estabelecem ligações não covalentes com o amido, restando melhor as hélices duplas e alterando a digestibilidade (Muñoz-Llandes et al., 2024). Imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM) mostram a fusão completa dos grânulos de amido, formando estruturas agregadas densas (Muñoz-Llandes et al., 2024; Adebayo & Oladunjoye, 2024).

4 IMPACTOS NA FUNCIONALIDADE E SAÚDE

4.1 DIGESTIBILIDADE DE AMIDO E PROTEÍNA

A combinação de germinação e extrusão modifica as frações de amido: amido rapidamente digestível (RDS), amido de digestão lenta (SDS) e amido resistente (RS). O uso de tremoço germinado por sete dias em extrusados de milho aumentou o SDS para 10,56%, sugerindo uma liberação mais controlada de glicose (Muñoz-Llandes et al., 2024). Em cookies de feijão preto germinado, a substituição parcial da farinha de milho resultou em um índice glicêmico (IG) significativamente menor (Rosa-Millán et al., 2017).

A digestibilidade proteica também é aprimorada. A extrusão completa a inativação de fatores antinutricionais iniciada na germinação (Nongmaithem *et al.*, 2024). Em produtos baseados em tremoço, as mudanças na estrutura secundária das proteínas (redução de folhas- β e aumento de hélices- α) facilitam o acesso de enzimas proteolíticas, elevando a digestibilidade para níveis próximos aos da caseína (Muñoz-Llandes *et al.*, 2023).

4.2 PROPRIEDADES ANTIOXIDANTES E HIPOGLICEMICAS

A germinação aumenta substancialmente o conteúdo de compostos fenólicos totais (TPC) e flavonoides totais (TFC) (Gong *et al.*, 2018; Nongmaithem *et al.*, 2024). Embora a extrusão possa causar alguma degradação térmica, ela auxilia na liberação de fenólicos ligados à parede celular (Nongmaithem *et al.*, 2024). No milho integral germinado e extrusado, observou-se um aumento de 221% na atividade inibidora de α -glucosidase e de 105% na de α -amilase, reforçando o potencial antidiabético desses alimentos (Gong *et al.*, 2018).

5 CONCLUSÃO

A integração da germinação e extrusão em pseudocereais e leguminosas representa uma estratégia tecnológica robusta para a criação de alimentos funcionais. Esta combinação não apenas elimina barreiras nutricionais, como os antinutrientes, mas também reorganiza a microestrutura dos grãos para favorecer a saúde metabólica e a absorção de nutrientes essenciais. Os avanços científicos aqui apresentados demonstram a viabilidade técnica de produzir *snacks* e ingredientes com alto valor agregado, atendendo às

demandas contemporâneas por dietas mais saudáveis e sustentáveis.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante a elaboração deste manuscrito, a autora utilizou a ferramenta de inteligência artificial **NotebookLM** como apoio à redação científica, organização do texto e revisão linguística. Todo o conteúdo foi cuidadosamente revisado e validado pela autora, que assume integral responsabilidade pelas informações apresentadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADEBAYO, A. I.; OLADUNJOYE, A. O. Proximate, structural, textural, sensory and microbiological properties of non-gluten extrudate using Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and a sprouted legume (*Phaseolus lunatus* L.). **Food Science and Technology International**, v. 32, n. 2, p. 189–200, 2024.
- GONG, K. et al. Effects of germination combined with extrusion on the nutritional composition, functional properties and polyphenol profile and related in vitro hypoglycemic effect of whole grain corn. **Journal of Cereal Science**, v. 83, p. 1–8, 2018.
- ITTHIVADHANAPONG, P. et al. Optimization of extrusion parameters for germinated Tubtim Chum Phae rice flour-based extruded snack fortified with silkworm pupae using response surface methodology. **Applied Food Research**, v. 6, p. 101596, 2026.
- MUÑOZ-LLANDES, C. B. et al. Lupinus sprouts a new and potential ingredient in extrusion process: Physicochemical, nutritional and structural evaluation. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 90, p. 103515, 2023.
- MUÑOZ-LLANDES, C. B. et al. Incorporation of germinated lupin into corn-based extrudates: Focus on starch digestibility, matrix structure and physicochemical properties. **Food Chemistry**, v. 458, p. 140196, 2024.
- NONGMAITHEM, R. et al. Effect of extrusion process on germinated lentil (*Lens culinaris*) based snack foods: Impact on starch digestibility, physio-functional, and antioxidant properties. **Measurement: Food**, v. 13, p. 100132, 2024.
- ROSA-MILLÁN, J. de la; PÉREZ-CARRILLO, E.; GUAJARDO-FLORES, S. Effect of germinated black bean cotyledons (*Phaseolus vulgaris* L.) as an extruded flour ingredient on physicochemical characteristics, in vitro digestibility starch, and protein of nixtamalized blue maize cookies. **Starch/Stärke**, v. 69, p. 1600085, 2017.

CAPÍTULO 9

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA PRODUÇÃO DE INGREDIENTES FUNCIONAIS

VALUE ADDITION FROM AGROINDUSTRIAL WASTE FOR THE PRODUCTION OF FUNCTIONAL INGREDIENTS

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-009>

Resumo

A crescente geração de resíduos oriundos de processos agroindustriais representa um desafio ambiental e econômico de magnitude global. Ao mesmo tempo, esses subprodutos constituem fontes ricas em compostos bioativos, tais como polifenóis, carotenoides, fibras alimentares, peptídeos e polissacarídeos, que possuem comprovadas propriedades funcionais benéficas à saúde humana. O presente capítulo aborda a valorização de resíduos agroindustriais como estratégia para a produção de ingredientes funcionais, integrando os princípios da bioeconomia circular. Revisam-se os principais tipos de resíduos gerados nas cadeias produtivas de frutas, cereais, oleaginosas, laticínios e cana-de-açúcar, bem como a composição fitoquímica desses materiais. São discutidas as tecnologias emergentes de extração sustentável incluindo a extração assistida por ultrassom (EAU), a extração assistida por micro-ondas (EAM), a extração por fluido supercrítico (EFS) e a utilização de solventes eutéticos naturais profundos (NADES) que permitem a recuperação eficiente de compostos bioativos com menor impacto ambiental. Adicionalmente, são apresentadas evidências científicas sobre as propriedades antioxidante, anti-inflamatória, antimicrobiana e prebiótica dos ingredientes obtidos, bem como seu potencial de aplicação em alimentos funcionais e nutracêuticos. Conclui-se que a valorização de resíduos agroindustriais representa uma abordagem promissora para a redução de perdas, a agregação de valor à cadeia produtiva e o desenvolvimento de produtos alimentícios com maior benefício nutricional e funcional, alinhando-se às metas de desenvolvimento sustentável globais.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; Bioeconomia circular; Compostos bioativos; Extração verde; Ingredientes funcionais; Polifenóis; Resíduos agroindustriais.

Abstract

The growing generation of waste from agro-industrial processes represents an environmental and economic challenge of global magnitude. At the same time, these by-products constitute rich sources of bioactive compounds, such as polyphenols, carotenoids, dietary fibers, peptides and polysaccharides, which have proven functional properties beneficial to human health. This chapter addresses the valorization of agro-industrial residues as a strategy for producing functional ingredients, integrating the principles of the circular bioeconomy. The main types of waste generated in the production chains of fruits, cereals, oilseeds, dairy

products and sugarcane are reviewed, as well as the phytochemical composition of these materials. Emerging sustainable extraction technologies are discussed including ultrasound-assisted extraction (UAE), microwave-assisted extraction (MAE), supercritical fluid extraction (SFE) and the use of natural deep eutectic solvents (NADES) which allow efficient recovery of bioactive compounds with lower environmental impact. Additionally, scientific evidence on the antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial and prebiotic properties of the obtained ingredients is presented, as well as their potential application in functional foods and nutraceuticals. It

Keywords: Agro-industrial residues; Bioactive compounds; Circular bioeconomy; Functional foods; Functional ingredients; Green extraction; Polyphenols.

1 INTRODUÇÃO

A indústria agroalimentar é responsável pela geração de volumes expressivos de resíduos sólidos e líquidos ao longo de suas etapas de produção, processamento e distribuição. Estima-se que aproximadamente 1,05 bilhão de toneladas de alimentos são desperdiçados anualmente no mundo, o equivalente a cerca de 132 kg per capita por ano, conforme reportado pelo Food Waste Index Report 2024 do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2024). Esse cenário impõe pressões ambientais consideráveis, relacionadas à emissão de gases de efeito estufa, à contaminação de solos e corpos hídricos, além de representar perdas econômicas significativas para os setores produtivos.

Contraditoriamente, os resíduos e subprodutos agroindustriais encerram em sua composição uma ampla variedade de compostos de alto valor biológico. Cascas, sementes, bagaços, tortas, soros e farelos frações habitualmente descartadas ou destinadas à alimentação animal são reconhecidamente fontes ricas em polifenóis, carotenoides, fibras alimentares antioxidantes, proteínas, peptídeos bioativos, vitaminas e minerais (Yadav *et al.*, 2024). Em diversas situações, a concentração desses compostos nas frações descartadas é superior àquela observada na porção comestível comercializada, como evidenciado nas cascas de uva, casca de romã, bagaço de maçã e farelo de trigo (Szabo *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a valorização de resíduos agroindustriais emerge como uma estratégia central para a transição em direção à bioeconomia circular, conceito que propõe a reinserção de materiais residuais em novos ciclos produtivos com vistas a maximizar a eficiência de recursos e minimizar resíduos (Trabelsi; Mourtzinis; Ramadan, 2023). A produção de ingredientes funcionais a partir desses resíduos configura uma das rotas mais promissoras, permitindo a obtenção de aditivos naturais, nutracêuticos e bioativos com ampla aplicação na indústria de alimentos, farmacêutica e cosmética (Verni; Casanova, 2022).

O avanço das tecnologias de extração verde, como a extração assistida por ultrassom (EAU), por micro-ondas (EAM), por fluido supercrítico (EFS) e por solventes eutéticos naturais profundos (NADES),

tem permitido a recuperação eficiente de compostos bioativos com menor consumo de solventes orgânicos, menor gasto energético e maior preservação da atividade biológica das moléculas (Vieira *et al.*, 2024). A literatura científica recente demonstra o potencial dessas abordagens para transformar resíduos em ingredientes funcionais de alto valor agregado, capazes de contribuir para o desenvolvimento de alimentos funcionais com efeitos benéficos documentados sobre a saúde humana (Othman *et al.*, 2025).

O presente capítulo tem como objetivo reunir e discutir os principais avanços científicos acerca da valorização de resíduos agroindustriais para a produção de ingredientes funcionais, com ênfase nos tipos de resíduos, nas técnicas de extração sustentáveis e nas propriedades bioativas e funcionais dos compostos recuperados, à luz de evidências publicadas nos últimos cinco anos em bases científicas de referência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: CARACTERIZAÇÃO E ESCALA DE GERAÇÃO

O conceito de resíduo agroindustrial abrange os coprodutos, subprodutos e efluentes gerados nas etapas de colheita, beneficiamento, processamento e industrialização de matérias-primas de origem vegetal e animal. Do ponto de vista da economia circular, tais materiais não devem ser tratados como resíduos finais, mas sim como insumos potenciais para novos processos produtivos (Verni; Casanova, 2022). A classificação desses materiais pode ser feita segundo a cadeia produtiva de origem: fruticultura (cascas, sementes, bagaços), cerealicultura (farelos, germes, palhas), produção de óleos vegetais (tortas, borragens), laticínios (soro de queijo, permeados) e usinas sucroalcooleiras (bagaço de cana, vinhaça) (Yadav *et al.*, 2024).

A escala de geração desses materiais é expressiva. O processamento de frutas e hortaliças, por exemplo, pode gerar entre 25% e 50% do peso total da matéria-prima em forma de resíduos (Angulo-López *et al.*, 2023). A indústria vitivinícola mundial gera anualmente milhões de toneladas de bagaço de uva, enquanto a indústria citrícola produz grandes volumes de casca e bagaço de laranja e limão, ricos em flavonoides, pectinas e limonoides (Szabo *et al.*, 2022). A cadeia da soja, uma das mais relevantes no contexto brasileiro, gera okara, casca e farelo com elevado teor proteico e isoflavonas (Othman *et al.*, 2025). Esses dados evidenciam o imenso potencial ainda subutilizado desses materiais.

2.2 COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA E VALOR NUTRICIONAL DOS RESÍDUOS

Os resíduos agroindustriais apresentam composição fitoquímica diversificada e dependente da espécie, variedade, condições de cultivo, grau de maturação e método de processamento. Entre os compostos bioativos mais relevantes encontrados nessas frações destacam-se: polifenóis (ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas, taninos), carotenoides (betacaroteno, licopeno, luteína, zeaxantina), fibras alimentares (pectinas, celulose, hemicelulose, amido resistente, beta-glucanas), peptídeos bioativos, óleos

essenciais, vitaminas lipossolúveis e minerais (Yadav *et al.*, 2024).

Os polifenóis constituem o grupo de compostos bioativos mais amplamente estudado em subprodutos vegetais. O bagaço de uva, por exemplo, apresenta elevadas concentrações de resveratrol, antocianinas e taninos condensados, compostos com reconhecida atividade antioxidante, cardioprotetora e antiproliferativa (Szabo *et al.*, 2022). A casca de romã é rica em ácido elágico e elagitaninos, com potente ação anti-inflamatória e antimicrobiana (Trabelsi; Mourtzinis; Ramadan, 2023). Os farelos de cereais, como o farelo de trigo e de aveia, contêm quantidades expressivas de fibra alimentar solúvel principalmente beta-glucanas associadas à modulação da glicemia pós-prandial e à redução do colesterol LDL (Angulo-López *et al.*, 2023).

Os carotenoides representam outro grupo de grande relevância. Subprodutos do processamento de tomate como a casca e as sementes são reconhecidos como fontes excepcionais de licopeno, carotenoide lipossolúvel com atividade antioxidante e associado à redução do risco de câncer de próstata e doenças cardiovasculares (Szabo *et al.*, 2022). Já o bagaço de cenoura e o farelo de arroz são fontes relevantes de betacaroteno e tocoferóis, respectivamente (Othman *et al.*, 2025).

A fibra alimentar antioxidante, definida como a combinação de fibra dietética com compostos fenólicos, representa uma categoria emergente de ingrediente funcional obtido de subprodutos agroindustriais. Estudos demonstram que esse tipo de fibra, quando extraída de bagaços e cascas de frutas, apresenta capacidade antioxidante superior à das fibras convencionais, além de efeitos prebióticos comprovados sobre a microbiota intestinal (Angulo-López *et al.*, 2023).

2.3 TECNOLOGIAS DE EXTRAÇÃO VERDE E RECUPERAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

A seleção da tecnologia de extração é determinante para a qualidade, o rendimento e a sustentabilidade ambiental do processo de valorização de resíduos. As técnicas convencionais, como a maceração, a extração soxhlet e a percolação com solventes orgânicos, embora amplamente empregadas, apresentam limitações importantes: alto consumo de solventes, longa duração do processo, risco de degradação de compostos termolábeis e elevada geração de resíduos secundários (Vieira *et al.*, 2024).

Em contrapartida, as tecnologias emergentes de extração verde alinham-se aos princípios da Química Verde e permitem a recuperação eficiente de compostos bioativos com menor impacto ambiental. A extração assistida por ultrassom (EAU) utiliza ondas ultrassônicas para promover a cavitação acústica em meios líquidos, fenômeno que resulta na desrupção celular e na liberação de compostos intracelulares, reduzindo o tempo de extração e o volume de solvente necessário (Vieira *et al.*, 2024). A extração assistida por micro-ondas (EAM) emprega energia eletromagnética para o aquecimento interno e seletivo da matriz vegetal, promovendo a ruptura das paredes celulares e a difusão dos analitos para o solvente extrator, com vantagens em termos de velocidade e eficiência energética (Trabelsi; Mourtzinis; Ramadan, 2023).

A extração por fluido supercrítico (EFS), especialmente com dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂), tem se consolidado como tecnologia de alto padrão para a recuperação de compostos lipofílicos, como carotenoides, tocoferóis e ácidos graxos essenciais. O SC-CO₂ é não tóxico, não inflamável, de baixo custo relativo e ecologicamente favorável, permitindo a obtenção de extratos de alta pureza isentos de resíduos de solventes orgânicos (Carvalho *et al.*, 2022 apud Vieira *et al.*, 2024). Mais recentemente, os solventes eutéticos naturais profundos (NADES) formados pela combinação de doadores e receptores de ligações de hidrogênio de origem natural, como açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos têm emergido como alternativa biodegradável e de baixa toxicidade para a extração de compostos polares, como flavonoides e antocianinas (Vieira *et al.*, 2024).

A extração assistida por enzimas (EAE) também merece destaque, pois a ação catalítica de celulasas, hemicelulasas e pectinases promove a degradação das paredes celulares vegetais, aumentando a acessibilidade e o rendimento de extração dos compostos bioativos sem necessidade de solventes adicionais (Othman *et al.*, 2025). A integração dessas tecnologias em estratégias de biorrefinaria, aliada ao aproveitamento integral da biomassa residual, representa o modelo mais avançado para a valorização sustentável de resíduos agroindustriais.

2.4 APLICAÇÕES EM ALIMENTOS FUNCIONAIS E NUTRACÊUTICOS

A incorporação de ingredientes funcionais derivados de resíduos agroindustriais em produtos alimentícios responde à crescente demanda dos consumidores por alimentos que, além do valor nutricional convencional, ofereçam benefícios mensuráveis à saúde. Compostos polifenólicos extraídos de subprodutos da indústria vitivinícola e citrícola têm sido incorporados em bebidas, pães, iogurtes e embutidos, conferindo não apenas propriedades antioxidantes, mas também efeitos conservantes e antimicrobianos que contribuem para a extensão da vida útil dos produtos (Szabo *et al.*, 2022).

A microencapsulação de extratos bioativos provenientes de resíduos tem se mostrado estratégia eficaz para aumentar a estabilidade, a biodisponibilidade e a funcionalidade tecnológica dos ingredientes durante o processamento e o armazenamento. Técnicas como spray drying, coacervação complexa e encapsulação em matrizes de amido resistente ou proteínas do soro de leite têm sido empregadas com sucesso para proteger compostos sensíveis ao calor, à luz e ao oxigênio, como os carotenoides e as antocianinas (Yadav *et al.*, 2024).

No âmbito dos nutraceuticos, extratos padronizados de polifenóis de uva, licopeno de tomate, beta-glucanas de aveia e isoflavonas de soja obtidos a partir de resíduos de processamento já figuram como ingredientes reconhecidos por agências regulatórias internacionais, como a EFSA (European Food Safety Authority) e a FDA (Food and Drug Administration), com alegações de saúde relacionadas à redução do risco cardiovascular, modulação do metabolismo glicídico e suporte à função imune (Vieira *et al.*, 2024).

Esse reconhecimento regulatório representa um avanço significativo para a consolidação do mercado de ingredientes derivados de resíduos agroindustriais.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PRINCIPAIS CADEIAS PRODUTIVAS E SEUS RESÍDUOS COM POTENCIAL FUNCIONAL

O Brasil, como um dos maiores produtores agrícolas do mundo, gera volumes expressivos de resíduos agroindustriais ao longo de suas cadeias produtivas de destaque, como a citricultura, a vitivinicultura, a sojicultura, a canaveieira e a produção láctea. A valorização desses resíduos possui, portanto, relevância estratégica tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e nutricional (Angulo-López *et al.*, 2023).

Na cadeia citrícola, o processamento de laranjas para a produção de suco gera resíduos correspondentes a aproximadamente 50% do peso total da fruta, incluindo cascas, sementes e bagaço. Esses materiais são ricos em pectinas de alto grau de metoxilação, flavonoides (hesperidina, naringenina, nobiletina), limonoides e óleos essenciais. A hesperidina, em particular, tem demonstrado atividades anti-inflamatória, vasodilatadora e hipoglicemiante em estudos *in vivo*, sendo apontada como ingrediente funcional de alto valor para aplicações nutraceuticas (Szabo *et al.*, 2022). As pectinas extraídas de cascas cítricas encontram aplicação como agentes gelificantes, encapsulantes e prebióticos em formulações alimentícias e farmacêuticas.

O bagaço de uva principal resíduo da vinicultura representa fonte nobre de polifenóis, especialmente procianidinas, antocianinas, ácido gálico e resveratrol. Estudos recentes demonstraram que extratos de bagaço de uva tinta apresentam capacidade antioxidante superior à de antioxidantes sintéticos amplamente utilizados, como o BHT (butil-hidroxitolueno), além de efeitos cardioprotetores documentados em modelos experimentais (Verni; Casanova, 2022). A farinha obtida do bagaço de uva tem sido testada como ingrediente funcional em produtos de panificação, iogurtes e bebidas, com resultados satisfatórios do ponto de vista tecnológico e sensorial.

Na cadeia da soja, o okara resíduo sólido obtido durante a fabricação de extrato de soja e tofu contém proteínas de alta qualidade, isoflavonas (genisteína, daidzeína), fibras solúveis e insolúveis e fosfolípidios. As isoflavonas da soja são fitoestrógenos com atividade moduladora sobre receptores estrogênicos, associados à atenuação de sintomas do climatério e à preservação da densidade óssea em mulheres na pós-menopausa (Yadav *et al.*, 2024). O aproveitamento do okara como fonte de proteínas e isoflavonas para enriquecimento de alimentos processados representa uma oportunidade de valorização ainda pouco explorada industrialmente no Brasil.

O soro de queijo, coproduto da indústria láctea, contém proteínas de alto valor biológico (beta-lactoglobulina, alfa-lactoalbumina, imunoglobulinas), lactoferrina, lactose e minerais. A hidrólise

enzimática dessas proteínas resulta em peptídeos bioativos com atividade anti-hipertensiva (inibidores da enzima conversora de angiotensina ECA), imunomoduladora e antimicrobiana (Trabelsi; Mourtzinis; Ramadan, 2023). Concentrados e isolados proteicos do soro, bem como hidrolisados peptídicos, constituem ingredientes funcionais consolidados no mercado de suplementos esportivos e alimentos enriquecidos.

3.2 EVIDÊNCIAS CIENTÍFICAS SOBRE AS PROPRIEDADES FUNCIONAIS DOS INGREDIENTES OBTIDOS

As evidências científicas acumuladas nos últimos anos consolidam o potencial dos ingredientes funcionais derivados de resíduos agroindustriais para a promoção da saúde humana. A atividade antioxidante é a propriedade mais amplamente documentada, com estudos demonstrando que extratos polifenólicos de subprodutos vegetais apresentam capacidade de neutralização de radicais livres comparável ou superior à de antioxidantes de referência, como o Trolox e o ácido ascórbico (Othman *et al.*, 2025).

Do ponto de vista cardiovascular, os polifenóis extraídos de resíduos de frutas vermelhas, maçã e uva demonstraram capacidade de inibir a oxidação de lipoproteínas de baixa densidade (LDL), reduzir marcadores inflamatórios sistêmicos como as interleucinas IL-6 e IL-1 β e o fator de necrose tumoral TNF- α e modular a função endotelial vascular (Szabo *et al.*, 2022). Esses efeitos assumem relevância clínica considerável no contexto das doenças cardiovasculares, principal causa de mortalidade global.

No que se refere à modulação da microbiota intestinal, a fibra alimentar antioxidante e as pectinas derivadas de resíduos agroindustriais demonstraram efeito prebiótico seletivo sobre populações de bactérias benéficas, como *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, ao mesmo tempo em que reduziram a abundância de microrganismos patogênicos oportunistas (Angulo-López *et al.*, 2023). Essa modulação está associada à produção de ácidos graxos de cadeia curta (AGCC) acetato, propionato e butirato com efeitos anti-inflamatórios e protetores da mucosa intestinal, implicando benefícios não apenas gastrointestinais, mas também sistêmicos, incluindo a regulação metabólica e imune.

A atividade antimicrobiana de extratos provenientes de cascas de frutas e sementes tem sido documentada contra patógenos alimentares relevantes, como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. e *Listeria monocytogenes* (Yadav *et al.*, 2024). Esses achados abrem perspectivas para a utilização de extratos bioativos naturais como conservantes de alimentos em substituição parcial a aditivos sintéticos, atendendo à demanda crescente dos consumidores por produtos com lista de ingredientes mais simples e naturais.

3.3 DESAFIOS TECNOLÓGICOS, REGULATÓRIOS E DE ESCALONAMENTO

Apesar do considerável avanço científico, a transição da valorização de resíduos agroindustriais da escala laboratorial para a produção industrial enfrenta desafios significativos. Do ponto de vista tecnológico, a variabilidade composicional das matérias-primas residuais influenciada por sazonalidade, variedade, origem geográfica e condições de processamento dificulta a padronização dos extratos obtidos, requisito fundamental para aplicações alimentícias e farmacêuticas (Verni; Casanova, 2022).

O escalonamento dos processos de extração verde, especialmente da EFS com CO₂ supercrítico, ainda implica altos custos de investimento em equipamentos de alta pressão, representando uma barreira para pequenas e médias empresas do setor agroalimentar (Trabelsi; Mourtzinos; Ramadan, 2023). A adequação dos processos de secagem e estabilização dos extratos necessária para garantir vida útil adequada também adiciona complexidade e custo ao processo produtivo.

No âmbito regulatório, a legislação brasileira, por meio da Resolução RDC nº 243/2018 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), estabelece requisitos para alegações de propriedades funcionais em alimentos, demandando comprovação científica por meio de ensaios clínicos controlados para a aprovação de novas alegações. Esse requisito, embora essencial para a segurança do consumidor, representa um investimento adicional para a validação de novos ingredientes funcionais derivados de resíduos (Vieira *et al.*, 2024). A harmonização das regulamentações nacionais com as diretrizes internacionais da EFSA e da FAO/OMS é necessária para facilitar a inserção desses ingredientes em mercados globais.

A perspectiva da biorrefinaria integrada, que propõe o aproveitamento sequencial e hierárquico de todas as frações de valor de um resíduo compostos bioativos de alto valor na primeira etapa, fibras e proteínas na segunda, e energia ou fertilizantes na etapa final representa o modelo mais eficiente e economicamente viável para a valorização plena de resíduos agroindustriais (Othman *et al.*, 2025). Esse modelo exige, contudo, investimento em pesquisa e desenvolvimento, infraestrutura adequada e articulação entre os setores acadêmico, industrial e governamental.

4 CONCLUSÃO

A valorização de resíduos agroindustriais para a produção de ingredientes funcionais representa uma das abordagens mais alinhadas aos princípios da sustentabilidade, da bioeconomia circular e do desenvolvimento de sistemas alimentares mais eficientes e saudáveis. As evidências científicas reunidas na literatura recente demonstram, de forma consistente, que subprodutos de cadeias produtivas como a citricultura, vitivinicultura, sojicultura, produção láctea e cerealicultura encerram compostos bioativos de elevado valor nutricional e funcional, com propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas, cardioprotetoras e prebióticas comprovadas.

O avanço das tecnologias de extração verde extração assistida por ultrassom, por micro-ondas, por fluido supercrítico e mediante solventes eutéticos naturais profundos tem viabilizado a recuperação eficiente desses compostos com menor impacto ambiental, respondendo aos imperativos da Química Verde e da economia de recursos. A combinação dessas tecnologias em plataformas de biorrefinaria integrada potencializa o aproveitamento pleno das frações residuais, gerando ingredientes com aplicações diversificadas na indústria de alimentos, farmacêutica e cosmética.

Os desafios remanescentes, relacionados à padronização composicional das matérias-primas, ao escalonamento industrial dos processos, ao custo tecnológico e às exigências regulatórias, não invalidam o potencial estratégico dessa abordagem, mas apontam para a necessidade de investimento continuado em pesquisa aplicada, formação de redes colaborativas entre academia e indústria e desenvolvimento de marcos regulatórios mais ágeis e harmonizados internacionalmente. A ciência e a tecnologia de alimentos desempenham papel central nesse processo, ao fornecer as bases científicas para a transformação de resíduos em recursos, contribuindo para sistemas alimentares mais sustentáveis, nutritivos e promotores da saúde humana.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante a elaboração deste manuscrito, a autora utilizou a ferramenta de inteligência artificial **Claude (Anthropic)** como apoio à redação científica, organização do texto e revisão linguística. Todo o conteúdo foi cuidadosamente revisado e validado pela autora, que assume integral responsabilidade pelas informações apresentadas neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Processo nº 14 2318 /2025-6.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada RDC nº 243, de 26 de julho de 2018**. Dispõe sobre os requisitos sanitários dos suplementos alimentares. Brasília: ANVISA, 2018.

ANGULO-LÓPEZ, J. E. *et al.* Antioxidant dietary fiber sourced from agroindustrial byproducts and its applications. **Foods**, v. 12, n. 1, p. 159, 2023. DOI: 10.3390/foods12010159.

OTHMAN, M. *et al.* **Bioactive compounds of agro-industrial by-products: current trends, recovery, and possible utilization**. *Nutrients*, 2025. PMC12189145.

SZABO, K. *et al.* Natural polyphenol recovery from apple-, cereal-, and tomato-processing by-products and related health-promoting properties. **Molecules**, v. 27, n. 22, p. 7977, 2022. DOI: 10.3390/molecules27227977.

TRABELSI, N.; MOURTZINOS, I.; RAMADAN, M. F. Valorization of bioactive compounds from bio-wastes of agro-food sector using green technologies. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1334315, 2023. DOI: 10.3389/fnut.2023.1334315.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Food Waste Index Report 2024**. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/food-waste-index-report-2024>. Acesso em: 5 jun. 2025.

VERNI, M.; CASANOVA, F. The potential of food by-products: bioprocessing, bioactive compounds extraction and functional ingredients utilization. **Foods**, v. 11, n. 24, p. 4092, 2022. DOI: 10.3390/foods11244092.

VIEIRA, A. C. F. *et al.* **Green extraction of bioactive compounds from plant-based agri-food residues**: advances toward sustainable valorization. *Nutrients*, 2024. PMC12693769.

YADAV, S. *et al.* Valorisation of agri-food waste for bioactive compounds: recent trends and future sustainable challenges. **Molecules**, v. 29, n. 9, p. 2055, 2024. DOI: 10.3390/molecules29092055.

CAPÍTULO 10

SUSTENTABILIDADE EM UNIDADES PRODUTORAS DE REFEIÇÕES: ESTRATÉGIAS DE GESTÃO AMBIENTAL, INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E ATUAÇÃO DO NUTRICIONISTA

SUSTAINABILITY IN FOODSERVICE OPERATIONS: ENVIRONMENTAL MANAGEMENT STRATEGIES, TECHNOLOGICAL INNOVATION, AND THE ROLE OF THE NUTRITIONIST

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-010>

Resumo

O presente estudo teve como objetivo revisar a literatura acerca das principais estratégias de sustentabilidade aplicadas às UPRs e à indústria de alimentos, enfatizando práticas de gestão ambiental, redução do desperdício, valorização de coprodutos agroindustriais, tecnologias sustentáveis e o papel do nutricionista na promoção de sistemas alimentares sustentáveis. Foi realizada uma revisão da literatura utilizando artigos científicos publicados entre 2020 e 2026. As buscas foram conduzidas nas bases *ScienceDirect*, *PubMed*, *Scopus* e *Web of Science*, empregando descritores relacionados à sustainability, food systems, food waste, circular economy, food processing, artificial intelligence, Food Science and Technology, and sustainable nutrition.. Os estudos demonstraram que estratégias como planejamento sustentável de cardápios, compras responsáveis, aproveitamento integral dos alimentos, valorização de coprodutos agroindustriais, fermentação, tecnologias de encapsulação, gestão eficiente de resíduos, Avaliação do Ciclo de Vida, digitalização dos processos e aplicação de inteligência artificial contribuem significativamente para reduzir desperdícios, otimizar o uso de recursos naturais e aumentar a eficiência operacional das unidades produtoras de refeições. Observou-se ainda que o nutricionista desempenha papel estratégico na implementação dessas ações por meio do planejamento da produção, gestão de compras, monitoramento de indicadores ambientais, educação alimentar e nutricional e incorporação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável às práticas de gestão. Conclui-se que a integração entre gestão ambiental, inovação tecnológica e atuação profissional constitui elemento essencial para o desenvolvimento de sistemas alimentares mais eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis, fortalecendo a contribuição das UPRs para a promoção da saúde, da segurança alimentar e do desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Gestão ambiental; Sistemas alimentares; Sustentabilidade; Unidades Produtoras de Refeições.

Abstract

This study aimed to review the scientific literature on the main sustainability strategies applied to Foodservice Operations and the food industry, emphasizing environmental management practices, food waste reduction, the valorization of agro-industrial by-products, sustainable technologies, and the role of

nutritionists in promoting sustainable food systems. A literature review was conducted using scientific articles published between 2020 and 2026. The literature search was performed in the ScienceDirect, PubMed, Scopus, and Web of Science databases using the following descriptors: sustainability, food systems, food waste, circular economy, food processing, artificial intelligence, Food Science and Technology, and sustainable nutrition. The reviewed studies demonstrated that strategies such as sustainable menu planning, responsible procurement, whole-food utilization, valorization of agro-industrial by-products, fermentation, encapsulation technologies, efficient waste management, Life Cycle Assessment (LCA), process digitalization, and the application of artificial intelligence significantly contribute to reducing food waste, optimizing the use of natural resources, and improving the operational efficiency of foodservice operations. Furthermore, nutritionists were identified as key professionals in implementing these strategies through production planning, procurement management, environmental performance monitoring, food and nutrition education, and the integration of the Sustainable Development Goals (SDGs) into management practices. It is concluded that the integration of environmental management, technological innovation, and professional expertise is essential for developing more efficient, resilient, and environmentally responsible food systems, thereby strengthening the contribution of foodservice operations to health promotion, food security, and sustainable development.

Keywords: Environmental management; Food systems; Foodservice operations; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a intensificação da urbanização e as mudanças nos padrões de consumo têm ampliado a demanda por alimentos e, conseqüentemente, aumentado a pressão sobre os recursos naturais. A produção, o processamento, a distribuição e o consumo de alimentos estão entre as atividades que mais contribuem para as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de água e energia e a geração de resíduos sólidos, tornando os sistemas alimentares um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável (FAO, 2019; Willett *et al.*, 2019). Diante desse cenário, a adoção de práticas sustentáveis na cadeia produtiva de alimentos tornou-se essencial para conciliar segurança alimentar, preservação ambiental, viabilidade econômica e promoção da saúde.

As Unidades Produtoras de Refeições (UPRs), anteriormente denominadas Unidades de Alimentação e Nutrição (UANs), desempenham papel estratégico nesse contexto por serem responsáveis pela produção diária de grande volume de refeições em hospitais, escolas, universidades, restaurantes comerciais, indústrias e empresas. Entretanto, essas unidades também apresentam elevado consumo de água, energia elétrica, matérias-primas e embalagens, além de gerarem quantidades expressivas de resíduos orgânicos e recicláveis. Estudos demonstram que o desperdício de alimentos ao longo das etapas de

aquisição, armazenamento, pré-preparo, preparo, distribuição e consumo representam um dos principais fatores responsáveis pelos impactos ambientais e pelos elevados custos operacionais desses serviços (FAO, 2019; Boudalia *et al.*, 2026).

Além das estratégias convencionais de gestão ambiental, os avanços da Ciência e Tecnologia de Alimentos têm ampliado as possibilidades de produção sustentável por meio da aplicação de processos biotecnológicos, fermentação, encapsulação de compostos bioativos, biofortificação e tecnologias digitais. Ferramentas como inteligência artificial, sensores inteligentes, sistemas automatizados de monitoramento e modelos preditivos vêm sendo empregadas para otimizar o planejamento da produção, reduzir desperdícios, melhorar a eficiência energética e apoiar a tomada de decisão em serviços de alimentação e na indústria de alimentos (Kuhl, 2025; Dahiya *et al.*, 2023; Shishir *et al.*, 2026). Essas inovações reforçam a necessidade de integrar sustentabilidade ambiental, inovação tecnológica e segurança dos alimentos em todas as etapas da cadeia produtiva.

Nesse cenário, o nutricionista assume papel fundamental como gestor de sistemas alimentares sustentáveis. Além de ser responsável pelo planejamento de cardápios nutricionalmente adequados, esse profissional participa da gestão de compras, da seleção de fornecedores, da implantação de Boas Práticas de Fabricação, do controle de desperdícios, da gestão de resíduos, da educação alimentar e nutricional e do monitoramento de indicadores de desempenho ambiental (Carvalho *et al.*, 2024). Sua atuação torna-se decisiva para promover o uso racional dos recursos naturais, aumentar a eficiência operacional das unidades produtoras de refeições e contribuir para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à fome zero, saúde e bem-estar, consumo e produção responsáveis e ação contra a mudança global do clima (Brasil, 2014; Ashraf, 2025; WFP, 2026).

Embora diversos estudos abordem aspectos específicos da sustentabilidade em serviços de alimentação e na indústria de alimentos, observa-se que as evidências relacionadas às estratégias de gestão ambiental, às tecnologias sustentáveis e ao papel do nutricionista encontram-se dispersas na literatura científica. Essa fragmentação dificulta a compreensão integrada das diferentes abordagens disponíveis e de suas aplicações práticas na gestão de unidades produtoras de refeições. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo revisar a literatura científica sobre as principais estratégias de sustentabilidade aplicadas às Unidades Produtoras de Refeições e à indústria de alimentos, discutindo práticas de gestão ambiental, redução do desperdício, valorização de resíduos, tecnologias sustentáveis e o papel do nutricionista na promoção de sistemas alimentares mais eficientes, seguros e ambientalmente responsáveis.

2 METODOLOGIA

Foram avaliados artigos publicados entre os anos de 2020 e 2026, nas bases de dados *ScienceDirect*, *PubMed*, *Scopus* e *Web of Science*. A busca inicial ocorreu empregando-se o operador booleano *and* e *or*

entre os descritores: *Food Sustainability, Sustainable Food Systems, Food Waste, Food Service, Food Industry, Food Production, Circular Economy, Environmental Management, Food Fortification, Functional Foods, Food Processing, Artificial Intelligence, Nutritionist, Unit Food Service, Food and Nutrition Unit, Food Science and Technology* e *Sustainable Nutrition*.

Inicialmente, os estudos foram selecionados por meio da leitura dos títulos e resumos. Posteriormente, os artigos potencialmente elegíveis foram analisados na íntegra. Foram incluídos estudos originais, revisões sistemáticas e narrativas, documentos técnicos e diretrizes publicados em periódicos científicos indexados ou por instituições reconhecidas, que abordassem pelo menos um dos seguintes temas: (i) sustentabilidade em unidades produtoras de refeições ou na indústria de alimentos; (ii) gestão ambiental aplicada aos serviços de alimentação; (iii) redução do desperdício e gestão de resíduos alimentares; (iv) aproveitamento de coprodutos agroindustriais; (v) economia circular; (vi) tecnologias sustentáveis aplicadas ao processamento de alimentos; e (vii) atribuições do nutricionista relacionadas à sustentabilidade dos sistemas alimentares.

Foram excluídos estudos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo, resumos de eventos científicos, editoriais, cartas ao editor e trabalhos que não apresentassem relação direta com o objetivo desta revisão. Após a seleção, os artigos foram organizados em planilhas eletrônicas para extração das principais informações, incluindo autores, ano de publicação, objetivo, metodologia empregada, estratégias sustentáveis avaliadas, tecnologias utilizadas e principais resultados. Posteriormente, os estudos foram agrupados em categorias temáticas, permitindo discutir de forma integrada aspectos relacionados à gestão ambiental, economia circular, tecnologias sustentáveis, redução do desperdício de alimentos e atuação do nutricionista em unidades produtoras de refeições e na indústria de alimentos.

Declaração de uso de Inteligência Artificial: Durante a preparação deste manuscrito, a autora utilizou as ferramentas de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) e SciSpace como apoio ao processo de elaboração do trabalho. O ChatGPT foi empregado para auxiliar na organização da estrutura do manuscrito, aprimoramento da redação científica, revisão gramatical, tradução do resumo para o inglês e sugestões de coesão e clareza textual. O SciSpace foi utilizado durante a fase de revisão da literatura para auxiliar na leitura de artigos científicos, compreensão do conteúdo e identificação de referências relevantes. Todo o conteúdo gerado ou auxiliado por essas ferramentas foi cuidadosamente revisado, editado e validado pela autora, que assume integral responsabilidade pela originalidade, exatidão, interpretação e veracidade das informações apresentadas neste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sustentabilidade dos sistemas alimentares tem sido discutida sob uma perspectiva multidimensional, envolvendo aspectos ambientais, nutricionais, econômicos e sociais, com crescente

destaque para a atuação do nutricionista. Esta revisão teve como objetivo sintetizar as principais contribuições da literatura acerca da relação entre processamento de alimentos, economia circular, tecnologias, gestão de serviços de alimentação e atuação profissional do nutricionista na construção de sistemas alimentares sustentáveis. Os estudos analisados demonstram que o processamento e as tecnologias de conservação contribuem para a redução de perdas e desperdícios, aumento da vida útil e maior estabilidade dos alimentos (Knorr; Augustin; Tiwari, 2020; Pandey et al., 2023). A economia circular apresenta-se como estratégia para o reaproveitamento de resíduos, reciclagem, compostagem, biodigestão, produção de biogás e geração de produtos de maior valor agregado (Chiaraluce; Bentivoglio; Finco, 2021; Namkhah et al., 2023). Também foram destacadas ferramentas e tecnologias, como inteligência artificial, Big Data e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), aplicáveis ao monitoramento da produção, previsão de demanda, avaliação de impactos ambientais e otimização dos sistemas alimentares (Green et al., 2020; Rabbi; Amin, 2024; Notarnicola et al., 2016). No âmbito dos serviços de alimentação, as práticas sustentáveis incluem planejamento de cardápios, seleção de matérias-primas, gestão de estoques, redução de desperdícios, reciclagem e capacitação das equipes (Goodridge; Carlsson; Callaghan, 2022; Saavedra, 2024). Os estudos ainda evidenciam o nutricionista como agente estratégico na implementação de práticas sustentáveis, atuando no planejamento de cardápios, educação alimentar, gestão de serviços, promoção da saúde, formulação de políticas públicas e implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Lawrence, 2023; Gerstein et al., 2021; Muñoz-Martínez et al., 2026). Além disso, a escolha de matérias-primas e a avaliação integrada dos aspectos nutricionais, ambientais e socioeconômicos constituem elementos importantes para a construção de sistemas alimentares mais sustentáveis (Maree et al., 2024; Aiking, 2014). Conclui-se que a atuação do nutricionista deve ultrapassar a dimensão tradicional da alimentação, incorporando competências relacionadas à gestão ambiental, redução de desperdícios, economia circular, avaliação da sustentabilidade e educação alimentar, contribuindo para a construção de sistemas alimentares mais saudáveis, eficientes e ambientalmente responsáveis.

A sustentabilidade aplicada às UPRs vai além da simples redução da geração de resíduos. Ela envolve o planejamento integrado dos processos produtivos, a utilização racional dos recursos naturais, a adoção de tecnologias mais eficientes, a valorização de coprodutos agroindustriais, a implementação de programas de reciclagem e compostagem e a incorporação dos princípios da economia circular (Marques et al., 2025). Nesse sentido, o aproveitamento de resíduos alimentares como fontes de compostos bioativos, fibras e ingredientes funcionais tem recebido crescente atenção da comunidade científica, contribuindo simultaneamente para a redução dos impactos ambientais e para o desenvolvimento de alimentos com maior valor agregado (Darko et al., 2024; Gonçalves et al., 2026). Nesse contexto, a transformação dos sistemas alimentares em modelos mais sustentáveis representa uma estratégia fundamental para conciliar desenvolvimento econômico, preservação ambiental e promoção da saúde da população (Aiking, 2014;

Willett *et al.*, 2019).

Os estudos analisados demonstram que a sustentabilidade dos sistemas alimentares deve ser compreendida de forma integrada, considerando simultaneamente aspectos ambientais, sociais, econômicos e nutricionais. Embora cada estudo tenha abordado diferentes perspectivas, todos enfatizam que a sustentabilidade não depende exclusivamente da produção agrícola, mas envolve todas as etapas da cadeia de alimentos, incluindo processamento, distribuição, comercialização, consumo e gerenciamento dos resíduos gerados. Knorr, Augustin e Tiwari (2020) destacam que o processamento de alimentos exerce papel fundamental na sustentabilidade dos sistemas alimentares modernos. Tradicionalmente, o processamento industrial foi associado ao aumento do consumo de energia e à utilização intensiva de recursos naturais. Entretanto, os autores demonstram que tecnologias adequadas de processamento contribuem significativamente para reduzir perdas pós-colheita, aumentar a vida útil dos alimentos, melhorar sua estabilidade microbiológica e ampliar a disponibilidade de nutrientes ao longo da cadeia produtiva.

Além da conservação dos alimentos, o processamento adequado permite maior aproveitamento das matérias-primas e favorece a utilização de ingredientes provenientes de coprodutos agroindustriais, reduzindo a quantidade de resíduos destinados ao descarte. Esse conceito aproxima-se dos princípios da economia circular, nos quais resíduos anteriormente considerados sem valor passam a constituir novas matérias-primas para a produção de alimentos, ingredientes funcionais e compostos bioativos. Essa abordagem vem sendo fortalecida por avanços na Ciência e Tecnologia de Alimentos, especialmente por meio de processos biotecnológicos, fermentação e desenvolvimento de novos ingredientes alimentícios (Ligarda-Samanez *et al.*, 2025). Corroborando com essa visão, Green *et al.* (2020) ressaltam que a sustentabilidade dos sistemas alimentares não pode ser avaliada apenas sob a perspectiva ambiental. Os autores propõem a integração entre indicadores ambientais, nutricionais e de saúde pública, demonstrando que alimentos ambientalmente sustentáveis também devem promover dietas equilibradas e contribuir para a prevenção das doenças crônicas não transmissíveis. Essa abordagem amplia o conceito tradicional de sustentabilidade, incorporando indicadores relacionados à qualidade nutricional, acessibilidade econômica e bem-estar da população.

A integração entre nutrição e sustentabilidade tem sido amplamente discutida, principalmente após a publicação do relatório da Comissão EAT-Lancet, que propõe sistemas alimentares capazes de atender às necessidades nutricionais da população mundial com menor impacto ambiental (Harmon & Gerald, 2007; Willett *et al.*, 2019). Nesse contexto, torna-se evidente que estratégias voltadas exclusivamente à redução dos impactos ambientais não são suficientes se não estiverem associadas à promoção da saúde e à garantia da segurança alimentar. Reforçando que a sustentabilidade deve iniciar ainda na produção primária dos alimentos como na agricultura regenerativa, agricultura orgânica, sistemas biodinâmicos, agricultura de precisão e manejo sustentável do solo (Carvalho *et al.*, 2024)

Outro aspecto relevante identificado na literatura refere-se à necessidade de mensurar a sustentabilidade por meio de indicadores objetivos. Nesse sentido, Bruno *et al.* (2025) propuseram um modelo baseado na Avaliação do Ciclo de Vida da Sustentabilidade (*Life Cycle Sustainability Assessment* – LCSA), integrando indicadores ambientais, sociais e econômicos. Diferentemente das avaliações convencionais, que frequentemente consideram apenas emissões de carbono ou consumo de recursos naturais, a abordagem proposta permite avaliar simultaneamente impactos relacionados ao consumo de água e energia, geração de resíduos, custos operacionais, condições de trabalho e responsabilidade social.

A utilização de indicadores representa uma ferramenta importante para a gestão das Unidades Produtoras de Refeições, permitindo monitorar continuamente fatores como consumo de água, consumo energético, desperdício de alimentos, geração de resíduos recicláveis e orgânicos, índice de sobras e restos, além da eficiência operacional dos processos produtivos. Esses indicadores possibilitam identificar pontos críticos da produção e subsidiar ações corretivas voltadas à melhoria contínua dos serviços de alimentação (Da Costa Maynard *et al.*, 2020). A análise conjunta dos estudos evidencia um consenso quanto à necessidade de substituir modelos lineares de produção por sistemas alimentares mais integrados e sustentáveis. Enquanto Knorr, Augustin e Tiwari (2020) enfatizam a importância do processamento eficiente para reduzir perdas e aumentar a disponibilidade de alimentos, Green *et al.* (2020) ampliam essa discussão ao incorporar indicadores de saúde e nutrição. Por sua vez, Çakmakçı *et al.* (2023) demonstram que práticas sustentáveis devem iniciar na produção agrícola, enquanto Pagotto *et al.* (2021) destacam que a sustentabilidade somente pode ser efetivamente gerenciada quando acompanhada por indicadores capazes de avaliar simultaneamente aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Sob essa perspectiva, a sustentabilidade deixa de representar apenas uma estratégia ambiental e passa a constituir um modelo integrado de gestão dos sistemas alimentares. A adoção de tecnologias eficientes, o planejamento das etapas produtivas, a valorização dos recursos naturais, o monitoramento de indicadores e a atuação de profissionais capacitados, especialmente do nutricionista, tornam-se elementos fundamentais para promover sistemas alimentares mais resilientes, economicamente viáveis e ambientalmente responsáveis. Dessa forma, a Ciência e Tecnologia de Alimentos desempenha papel estratégico na integração entre inovação tecnológica, segurança alimentar e sustentabilidade, contribuindo para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e para a construção de sistemas alimentares capazes de atender às demandas atuais e futuras da sociedade.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo revisar a literatura científica acerca das principais estratégias de sustentabilidade aplicadas às Unidades Produtoras de Refeições (UPRs) e à indústria de alimentos, enfatizando práticas de gestão ambiental, redução do desperdício, valorização de coprodutos agroindustriais,

tecnologias sustentáveis e a atuação do nutricionista na promoção de sistemas alimentares mais sustentáveis. A revisão da literatura permitiu integrar evidências recentes sobre diferentes abordagens capazes de reduzir os impactos ambientais da produção de alimentos sem comprometer a segurança dos alimentos, a qualidade nutricional e a eficiência operacional das unidades produtoras de refeições.

Os estudos analisados evidenciaram que estratégias como o planejamento sustentável de cardápios, compras responsáveis, aproveitamento integral dos alimentos, valorização de resíduos agroindustriais, fermentação, tecnologias de encapsulação, economia circular, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e aplicação da inteligência artificial representam ferramentas importantes para reduzir desperdícios, otimizar o uso de água, energia e matérias-primas, aumentar a vida útil dos alimentos e promover maior eficiência produtiva. Também foi observado consenso na literatura quanto à necessidade de integrar indicadores ambientais, nutricionais, sociais e econômicos para avaliar a sustentabilidade dos sistemas alimentares de forma mais abrangente, permitindo que a gestão das UPRs seja orientada por critérios técnicos e mensuráveis.

Outro aspecto relevante identificado nesta revisão refere-se ao papel estratégico do nutricionista como agente promotor da sustentabilidade. Além das atribuições tradicionais relacionadas ao planejamento alimentar e à segurança dos alimentos, esse profissional assume funções voltadas à gestão ambiental, ao monitoramento de indicadores de desperdício, à educação alimentar e nutricional, à implementação de práticas sustentáveis e à incorporação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nas rotinas das unidades produtoras de refeições. Dessa forma, a atuação integrada do nutricionista contribui para fortalecer sistemas alimentares mais resilientes, eficientes e ambientalmente responsáveis. Como contribuição científica, este estudo reúne e sistematiza evidências recentes sobre sustentabilidade aplicada às UPRs e à indústria de alimentos, apresentando uma visão integrada das principais estratégias tecnológicas, gerenciais e operacionais descritas na literatura. A organização dessas informações pode subsidiar pesquisadores, nutricionistas, gestores e profissionais da Ciência e Tecnologia de Alimentos na adoção de práticas sustentáveis, apoiando a tomada de decisão e o desenvolvimento de políticas voltadas à redução dos impactos ambientais da produção de refeições.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras priorizem estudos experimentais e de campo que avaliem a efetividade das estratégias sustentáveis em diferentes tipos de Unidades Produtoras de Refeições, incluindo análises econômicas, ambientais e nutricionais de longo prazo. Também são necessários estudos que investiguem a aplicação de tecnologias emergentes, como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), rastreabilidade digital, automação de processos e modelos preditivos para redução de desperdícios, bem como pesquisas voltadas à construção e validação de indicadores específicos de sustentabilidade para serviços de alimentação. Essas abordagens poderão contribuir para o fortalecimento de sistemas alimentares mais eficientes, inovadores e alinhados às demandas da segurança alimentar, da saúde pública e do

desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

AIKING, H. Protein production: Planet, profit, plus people? **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 100, supl. 1, p. 483S-489S, 2014.

ASHRAF, S. A. Food fortification as a sustainable global strategy to mitigate micronutrient deficiencies and improve public health. **Discover Food**, v. 5, 2025

BOUDALIA, S.; SYMEON, G. K.; DOTAS, V.; GUEBOUDJI, Z.; KOUADRI, I.; SEHILI, B.; TERFA, M. T.; SMETI, S.; GUEROUI, Y.; BOUSBIA, A. The valorization of agrifood byproducts and waste to advance the Sustainable Development Goals: Current state and new perspectives. **Sustainability**, v. 18, 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Guia alimentar para a população brasileira**. 2. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2014.

BRUNO, A.; MENICHINI, T.; SILVESTRI, L. Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA): A comprehensive overview of existing integrated approaches to LCA, S-LCA, and LCC. **European Journal of Sustainable Development**, v. 14, n. 3, 2025.

CARVALHO, G. P.; COSTA-CAMILO, E.; DUARTE, I. Advancing health and sustainability: A holistic approach to food production and dietary habits. **Foods**, v. 13, 2024.

CHIARALUCE, G.; BENTIVOGLIO, D.; FINCO, A. Circular economy for a sustainable agri-food supply chain: A review for current trends and future pathways. **Sustainability**, v. 13, n. 16, art. 9294, 2021.

DA COSTA MAYNARD, D.; VIDIGAL, M. D.; FARAGE, P.; ZANDONADI, R.; NAKANO, E.; BOTELHO, R. Environmental, social and economic sustainability indicators applied to food services: A systematic review. **Sustainability**, v. 12, 2020.

DAHIYA, D.; TERPOU, A.; DASENAKI, M.; NIGAM, P. S. Current status and future prospects of bioactive molecules delivered through sustainable encapsulation techniques for food fortification. **Sustainable Food Technology**, v. 1, n. 4, p. 500-510, 2023.

DARKO, H. S. O.; ISMAIEL, L.; FANESI, B.; PACETTI, D.; LUCCI, P. Current trends in food processing by-products as sources of high value-added compounds in food fortification. **Foods**, v. 13, 2024.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

GERSTEIN, D. E. et al. Sustainability and registered dietitian nutritionists: Experiences and opportunities in food systems practice. **Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics**, v. 121, 2021.

GONÇALVES, E. M.; PESTANA, J.; ALVARENGA, N. Fermenting the unused: Microbial biotransformation of food industry by-products for circular bioeconomy valorisation. **Fermentation**, v. 12, 2026.

GOODRIDGE, L.; CARLSSON, L.; CALLAGHAN, E. G. Mapping the roles of nutrition and dietetics professionals in sustainable food systems and exploring opportunities for strategic collaboration. **Canadian Journal of Dietetic Practice and Research**, v. 83, n. 4, p. 175-179, 2022. DOI:

GREEN, A.; NEMECEK, T.; CHAUDHARY, A.; MATHYS, A. Assessing nutritional, health, and environmental sustainability dimensions of agri-food production. **Global Food Security**, v. 26, art. 100406, 2020.

HARMON, A. H.; GERALD, B. L. Position of the American Dietetic Association: Food and nutrition professionals can implement practices to conserve natural resources and support ecological sustainability. **Journal of the American Dietetic Association**, v. 107, n. 6, p. 1033-1043, 2007.

KNORR, D.; AUGUSTIN, M. A.; TIWARI, B. Advancing the role of food processing for improved integration in sustainable food chains. **Frontiers in Nutrition**, v. 7, art. 34, 2020. DOI:

KUHL, E. AI for food: Accelerating and democratizing discovery and innovation. **npj Science of Food**, v. 9, 2025.

LAWRENCE, M. Dietitians as agents of change towards sustainable food systems. **Nutrition & Dietetics**, v. 80, 2023.

LIGARDA-SAMANEZ, C. A.; HUAMÁN-CARRIÓN, M. L.; CALSINA-PONCE, W. C. et al. Technological innovations and circular economy in the valorization of agri-food by-products: Advances, challenges and perspectives. **Foods**, v. 14, 2025.

MARQUES, C.; GÜNEŞ, S.; VILELA, A.; GOMES, R. Life-cycle assessment in agri-food systems and the wine industry: A circular economy perspective. **Foods**, v. 14, n. 9, art. 1553, 2025.

MAREE, D. M. et al. Sustainability assessment of dairy and plant-based beverages: Integrating environmental, nutritional and socio-economic dimensions. **Sustainable Production and Consumption**, v. 45, 2024.

MUÑOZ-MARTÍNEZ, J. et al. Towards sustainable food systems: The evolving role of nutrition professionals in achieving the Sustainable Development Goals. **Frontiers in Nutrition**, v. 13, 2026.

NAMKHAH, Z. et al. Advancing sustainability in the food and nutrition system: A review of artificial intelligence applications. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, 2023.

NOTARNICOLA, B. et al. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 399-409, 2016.

PAGOTTO, M.; HALPERN, B. S.; CARVALHO, L. T.; et al. Measuring sustainable food systems in Brazil: A framework and multidimensional index to evaluate socioeconomic, nutritional, and environmental aspects. **World Development**, v. 143, art. 105470, 2021.

PANDEY, V. K.; DAR, A. H.; ROHILLA, S.; MAHANTA, C. L.; SHAMS, R.; KHAN, S. A.; SINGH, R. Recent insights on the role of various food processing operations towards the development of sustainable food systems. **Circular Economy and Sustainability**, 2023.

RABBI, M. F.; AMIN, M. R. Circular economy in the food industry: A bibliometric review. **Circular Economy**, v. 3, 2024.

SAAVEDRA, M. C. Sustainable practices in commercial food services: A case study in São Paulo, Brazil. **Sustainability**, v. 16, 2024.

SHISHIR, M. R. I.; KHAN, S.; KARIM, N.; BILAL, M.; HUSSAIN, S.; SAIFULLAH, M.; RASHWAN, A. K.; TAHIR, H. E.; AHMED, I. A. M.; ZHANG, X.; LI, F. New frontiers in beverage fortification: Delivery of functional ingredients via micro- and nanoencapsulation in dairy and non-dairy beverages. **Food Research International**, v. 230, art. 118607, 2026. DOI:

WILLETT, W. et al. Food in the Anthropocene: The EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. **The Lancet**, v. 393, n. 10170, p. 447-492, 2019.

WORLD FOOD PROGRAMME (WFP). **Food Fortification**. Rome: World Food Programme, 2026. Disponível em: <https://www.wfp.org/publications/food-fortification>. Acesso em: 17 jul. 2026.

CAPÍTULO 11

MICROBIOTA INTESTINAL, PREBIÓTICOS, PROBIÓTICOS E PÓS-BIÓTICOS: AVANÇOS CIENTÍFICOS E APLICAÇÕES NA PROMOÇÃO DA SAÚDE

GUT MICROBIOTA, PREBIOTICS, PROBIOTICS AND POSTBIOTICS: SCIENTIFIC ADVANCES AND APPLICATIONS IN HEALTH PROMOTION

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-011>

Resumo

A microbiota intestinal humana constitui um ecossistema microbiano complexo, essencial à digestão, à imunidade e à comunicação bidirecional entre o intestino e o sistema nervoso central. O presente capítulo teve como objetivo apresentar uma revisão narrativa da literatura científica publicada entre 2021 e 2026 sobre os avanços relacionados à microbiota intestinal e aos compostos denominados prebióticos, probióticos e pós-bióticos, bem como suas aplicações na promoção da saúde humana. A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases PubMed, Scopus, ScienceDirect e SciELO, com complementação de documentos de consenso da International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) e diretrizes da Organização Mundial de Gastroenterologia. Os resultados evidenciam que a disbiose intestinal está associada a distúrbios metabólicos, imunológicos, neuropsiquiátricos e neurodegenerativos, e que prebióticos, probióticos e pós-bióticos apresentam mecanismos distintos, porém complementares, de modulação da microbiota, com destaque para a produção de ácidos graxos de cadeia curta e para a estabilidade tecnológica superior conferida pelos pós-bióticos. Conclui-se que a integração desses compostos ao desenvolvimento de alimentos funcionais representa uma estratégia promissora para a promoção da saúde, ainda que sejam necessários avanços regulatórios e estudos clínicos de longo prazo para consolidar seu uso seguro e padronizado.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; Microbiota intestinal; Pós-bióticos; Prebióticos; Probióticos.

Abstract

The human gut microbiota constitutes a complex microbial ecosystem essential to digestion, immunity and bidirectional communication between the gut and the central nervous system. This chapter aimed to present a narrative review of the scientific literature published between 2021 and 2026 on advances related to the gut microbiota and to the compounds known as prebiotics, probiotics and postbiotics, as well as their applications in the promotion of human health. The literature search was carried out in the PubMed, Scopus, ScienceDirect and SciELO databases, complemented by consensus documents from the International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) and guidelines from the World Gastroenterology Organisation. The results show that intestinal dysbiosis is associated with metabolic,

immune, neuropsychiatric and neurodegenerative disorders, and that prebiotics, probiotics and postbiotics present distinct yet complementary mechanisms of microbiota modulation, with emphasis on short-chain fatty acid production and on the superior technological stability conferred by postbiotics. It is concluded that the integration of these compounds into the development of functional foods represents a promising strategy for health promotion, although regulatory advances and long-term clinical studies are still needed to consolidate their safe and standardized use.

Keywords: Functional foods; Gut microbiota; Postbiotics; Prebiotics; Probiotics.

1 INTRODUÇÃO

O trato gastrointestinal humano abriga um ecossistema microbiano extremamente diverso, composto por bactérias, arqueias, fungos e vírus, cuja densidade e diversidade genética superam em muito o genoma humano. Esse conjunto de micro-organismos, denominado microbiota intestinal, atua como um verdadeiro órgão metabólico, participando da digestão de compostos não digeríveis pelo hospedeiro, da síntese de vitaminas, da maturação do sistema imunológico e da manutenção da integridade da barreira intestinal. Nas últimas duas décadas, o avanço das técnicas de sequenciamento de nova geração possibilitou compreender, com maior profundidade, a extensão das interações entre a microbiota e a fisiologia humana, revelando conexões antes insuspeitas com o metabolismo energético, o sistema imunológico e o sistema nervoso central, por meio do denominado eixo microbiota-intestino-cérebro (Balasubramanian *et al.*, 2024).

O desequilíbrio na composição e na funcionalidade da microbiota intestinal, conhecido como disbiose, tem sido associado a um número crescente de condições clínicas, incluindo obesidade, diabetes tipo 2, doenças inflamatórias intestinais, transtornos de ansiedade e depressão, além de doenças neurodegenerativas. Diante desse cenário, cresce o interesse científico e comercial por estratégias nutricionais capazes de modular positivamente a microbiota intestinal, das quais se destacam os prebióticos, os probióticos e, mais recentemente, os pós-bióticos. Esses compostos, denominados coletivamente de "bióticos", têm sido incorporados a alimentos, bebidas e suplementos alimentares em ritmo acelerado, impulsionados por um mercado global que já ultrapassa dezenas de bilhões de dólares e que apresenta projeções de crescimento contínuo até o final da presente década (Aditivos & Ingredientes, 2022).

Apesar da expansão comercial expressiva, ainda existem lacunas científicas relevantes quanto aos mecanismos de ação específicos de cada cepa probiótica, à padronização de doses e formulações, e ao arcabouço regulatório aplicável a essas categorias de ingredientes, sobretudo no que diz respeito aos pós-bióticos, cuja definição de consenso é relativamente recente. Some-se a isso a necessidade de compreender de que forma os subprodutos e resíduos agroindustriais podem ser aproveitados como fontes alternativas de substratos prebióticos, alinhando a inovação em alimentos funcionais aos princípios da economia

circular e da sustentabilidade na cadeia produtiva de alimentos (Vinderola *et al.*, 2024).

Diante do exposto, este capítulo tem como objetivo geral apresentar uma síntese atualizada dos avanços científicos, publicados majoritariamente entre 2021 e 2026, acerca da microbiota intestinal e dos prebióticos, probióticos e pós-bióticos, discutindo seus mecanismos de ação, suas evidências clínicas mais recentes e suas aplicações tecnológicas na indústria de alimentos. De forma específica, buscou-se: a) descrever a composição, as funções e os principais fatores associados à disbiose da microbiota intestinal; b) discutir as definições de consenso mais recentes propostas pela International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) para prebióticos, probióticos e pós-bióticos; c) analisar os mecanismos de ação e as evidências clínicas atuais relacionadas a esses compostos; e d) discutir os desafios tecnológicos, de encapsulamento e regulatórios envolvidos em sua aplicação como ingredientes funcionais. Justifica-se a relevância do tema pela sua aplicabilidade direta ao desenvolvimento de novos produtos alimentícios funcionais, bem como pela contribuição que a compreensão desses mecanismos oferece à promoção da saúde pública em contextos de crescente prevalência de doenças crônicas não transmissíveis (Organização Mundial de Gastroenterologia, 2023).

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de caráter descritivo e qualitativo, que teve por finalidade reunir e sintetizar as evidências científicas mais recentes sobre a microbiota intestinal e os compostos prebióticos, probióticos e pós-bióticos. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, ScienceDirect, SciELO e Google Acadêmico, utilizando os descritores, isolados e combinados, em português e em inglês: "microbiota intestinal", "gut microbiota", "prebióticos", "prebiotics", "probióticos", "probiotics", "pós-bióticos", "postbiotics", "eixo intestino-cérebro", "gut-brain axis" e "alimentos funcionais".

Priorizaram-se artigos originais, revisões sistemáticas e narrativas, e documentos de consenso publicados entre 2021 e 2026, admitindo-se a inclusão pontual de publicações de referência anteriores a esse período quando se tratassem de marcos conceituais amplamente citados pela comunidade científica, como os documentos de consenso da ISAPP sobre a definição e o escopo de prebióticos e pós-bióticos. Foram excluídos estudos sem revisão por pares, resumos de congresso sem dados completos e publicações redundantes. Os textos selecionados foram organizados tematicamente em quatro eixos principais: composição e funções da microbiota intestinal; conceito e mecanismos de ação dos prebióticos; conceito e evidências clínicas dos probióticos; e definição, componentes e aplicações tecnológicas dos pós-bióticos, os quais fundamentam a discussão apresentada na seção seguinte.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MICROBIOTA INTESTINAL: COMPOSIÇÃO, FUNÇÕES E DISBIOSE

O intestino humano abriga aproximadamente cem trilhões de micro-organismos, número que se aproxima ou supera a quantidade total de células do próprio hospedeiro, configurando um ecossistema cuja diversidade filogenética é dominada, no indivíduo adulto saudável, pelos filos Firmicutes e Bacteroidetes, seguidos por Actinobacteria, Proteobacteria e Verrucomicrobia. Essa comunidade microbiana é estabelecida progressivamente desde o nascimento, sofrendo influência do tipo de parto, da alimentação nos primeiros anos de vida, da dieta, do uso de antimicrobianos e de fatores ambientais, e tende a atingir relativa estabilidade na vida adulta, embora permaneça dinâmica ao longo de toda a vida.

Entre as principais funções atribuídas à microbiota intestinal estão a fermentação de substratos não digeridos no intestino delgado, com consequente produção de ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), como acetato, propionato e butirato; a síntese de vitaminas do complexo B e de vitamina K; a manutenção da integridade da barreira epitelial intestinal; a modulação do sistema imunológico inato e adaptativo; e a comunicação bidirecional com o sistema nervoso central por meio do nervo vago, de metabólitos microbianos e de mediadores neuroendócrinos, relação denominada eixo microbiota-intestino-cérebro. O butirato, especificamente, é a principal fonte energética dos colonócitos e apresenta propriedades anti-inflamatórias e de reforço da barreira intestinal, ao passo que o propionato participa da regulação da gliconeogênese hepática e da sinalização de saciedade.

A ruptura do equilíbrio dessa comunidade microbiana, conhecida como disbiose, tem sido associada a alterações na permeabilidade intestinal, à neuroinflamação e à modificação da síntese de neurotransmissores, mecanismos que contribuem para o desenvolvimento ou o agravamento de transtornos neuropsiquiátricos, como ansiedade e depressão, e de doenças neurodegenerativas, a exemplo da doença de Parkinson, na qual bactérias entéricas parecem estar envolvidas na produção de alfa-sinucleína, proteína associada à formação de corpos de Lewy. Adicionalmente, a disbiose intestinal figura como fator de risco relevante para doenças metabólicas, como obesidade e diabetes tipo 2, e para doenças inflamatórias intestinais, o que reforça a relevância clínica e tecnológica de estratégias nutricionais capazes de restaurar ou preservar o equilíbrio da microbiota.

3.2 PREBIÓTICOS: CONCEITO, FONTES E MECANISMOS DE AÇÃO

O conceito de prebiótico foi introduzido originalmente em 1995, quando se definiu como um ingrediente alimentar não digerível capaz de estimular seletivamente o crescimento e/ou a atividade de um número limitado de bactérias no cólon, beneficiando a saúde do hospedeiro. Em 2017, um painel de especialistas convocado pela International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) revisou e ampliou essa definição, passando a caracterizar o prebiótico como "um substrato que é utilizado

seletivamente por micro-organismos hospedeiros, conferindo um benefício à saúde" (Gibson *et al.*, 2017). Essa atualização ampliou o escopo do conceito para além das fibras alimentares, admitindo, em princípio, outros substratos não fibrosos, como determinados polifenóis e ácidos graxos poli-insaturados, desde que demonstrada a utilização seletiva por micro-organismos benéficos e o benefício clínico associado.

É importante destacar que nem toda fibra alimentar é um prebiótico: muitas fibras aumentam mecanicamente o bolo fecal e aceleram o trânsito intestinal sem, contudo, nutrir seletivamente micro-organismos benéficos específicos com benefício clínico comprovado. Entre os prebióticos mais estudados e com respaldo científico consolidado, destacam-se os fruto-oligossacarídeos (FOS), os galacto-oligossacarídeos (GOS), a inulina e o amido resistente, substratos fermentados preferencialmente por gêneros como *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*. Os galacto-oligossacarídeos, por exemplo, têm sido objeto de revisões recentes quanto à sua síntese enzimática, seu metabolismo pela microbiota e suas aplicações tecnológicas em alimentos, evidenciando efeitos bifidogênicos consistentes e boa estabilidade em diferentes matrizes alimentares (Wang *et al.*, 2023).

Do ponto de vista mecanístico, a fermentação colônica dos prebióticos resulta na produção de ácidos graxos de cadeia curta, que desempenham papel central nos efeitos benéficos atribuídos a esses compostos: o butirato exerce ação anti-inflamatória e nutre os colonócitos; o propionato modula a gliconeogênese hepática e à saciedade; e o acetato participa do metabolismo lipídico periférico. Além disso, os prebióticos contribuem para a inibição competitiva de patógenos entéricos, para o fortalecimento da barreira intestinal e para a modulação da resposta imunológica, com reflexos que se estendem a outros nichos microbianos além do intestino, como a microbiota vaginal e cutânea (Holscher, 2017).

3.3 PROBIÓTICOS: MECANISMOS DE AÇÃO E EVIDÊNCIAS CLÍNICAS RECENTES

Os probióticos são definidos como micro-organismos vivos que, quando administrados em quantidades adequadas, conferem benefício à saúde do hospedeiro, definição amplamente aceita pela comunidade científica internacional. Entre os gêneros mais utilizados estão as bactérias ácido-láticas do gênero *Lactobacillus sensu lato* atualmente reclassificadas taxonomicamente em diversos novos gêneros, como *Lacticaseibacillus*, *Lactiplantibacillus* e *Limosilactobacillus* além do gênero *Bifidobacterium*, da levedura *Saccharomyces boulardii* e mais recentemente, de novos probióticos como o *Clostridium butyricum*, já aprovado como novo alimento na União Europeia, conforme apontado em diretriz prática da Organização Mundial de Gastroenterologia (Organização Mundial de Gastroenterologia, 2023).

Os mecanismos de ação atribuídos aos probióticos incluem a competição por sítios de adesão e por nutrientes com micro-organismos patogênicos, a produção de compostos antimicrobianos, como bacteriocinas e ácidos orgânicos, o fortalecimento da barreira epitelial intestinal e a modulação da resposta imunológica inata e adaptativa. Estudos clínicos recentes têm ampliado a compreensão sobre o papel dos

probióticos e de seus metabólitos na modulação do eixo intestino-cérebro: revisão sistemática recente discutiu o papel de diferentes cepas probióticas e de seus metabólitos no tratamento adjuvante de quadros depressivos (Jach *et al.*, 2023), enquanto ensaio clínico randomizado, duplo-cego e controlado por placebo demonstrou que o consumo de leite fermentado contendo *Lactobacillus paracasei* cepa *Shirota* melhorou parâmetros de constipação intestinal em pacientes com depressão (Zhang *et al.*, 2023).

Nessa mesma direção, revisão recente sobre alimentos fermentados discutiu de que forma esses produtos podem ser utilizados para modular o eixo microbiota-intestino-cérebro em benefício da saúde mental, reforçando o potencial dos alimentos funcionais fermentados como veículos de entrega de micro-organismos benéficos e de seus metabólitos bioativos (Balasubramanian *et al.*, 2024). Não obstante os avanços, um dos principais desafios tecnológicos permanece relacionado à manutenção da viabilidade probiótica durante o processamento industrial, o armazenamento e a passagem pelo trato gastrointestinal, o que impulsiona o desenvolvimento de técnicas de encapsulamento discutidas na seção 3.5.

3.4 PÓS-BIÓTICOS: DEFINIÇÃO, COMPONENTES BIOATIVOS E VANTAGENS TECNOLÓGICAS

O termo pós-biótico ganhou definição de consenso em 2021, quando a ISAPP o caracterizou como "uma preparação de micro-organismos inanimados e/ou de seus componentes que confere um benefício à saúde do hospedeiro" (Salminen *et al.*, 2021). Essa definição buscou unificar a terminologia empregada anteriormente para descrever micro-organismos não viáveis com efeito benéfico como probióticos inativados pelo calor, paraprobióticos, lisados celulares ou fragmentos celulares, proporcionando maior clareza conceitual, regulatória e científica ao campo. Ainda assim, o debate acerca da delimitação exata do conceito permanece ativo na comunidade científica, com discussões recorrentes em eventos internacionais sobre a abrangência da definição e sua aplicabilidade regulatória (Vinderola *et al.*, 2024).

Segundo o consenso vigente, um pós-biótico deve necessariamente conter micro-organismos inativados, íntegros ou fragmentados, podendo ou não incluir metabólitos associados, e seu benefício à saúde deve ser demonstrado empiricamente na população-alvo, não podendo ser meramente inferido a partir do efeito conhecido do probiótico viável correspondente (Vinderola *et al.*, 2022). Entre os componentes bioativos frequentemente associados aos pós-bióticos estão fragmentos de parede celular, ácidos teicoicos, exopolissacarídeos, enzimas microbianas e metabólitos de fermentação, como ácidos graxos de cadeia curta e bacteriocinas.

Do ponto de vista tecnológico, os pós-bióticos apresentam vantagens importantes em relação aos probióticos vivos, sobretudo por não dependerem da manutenção da viabilidade celular durante o processamento, o transporte e o armazenamento dos produtos, o que confere maior estabilidade térmica, prazo de validade mais longo e menor sensibilidade a variações de pH e temperatura. Adicionalmente, por não envolverem micro-organismos vivos, os pós-bióticos apresentam menor risco de translocação bacteriana

em populações imunocomprometidas, ampliando seu potencial de aplicação segura em produtos direcionados a grupos vulneráveis. Esse conjunto de vantagens tem impulsionado um mercado global em rápida expansão, estimado em torno de 40,51 bilhões de dólares em 2020, com projeção de alcançar aproximadamente 83,30 bilhões de dólares até 2030, ainda que, até o momento, nenhuma agência regulatória tenha estabelecido parâmetros formais e específicos para a categoria.

3.5 SIMBIÓTICOS, ENCAPSULAMENTO E APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Os simbióticos correspondem a produtos que associam probióticos e prebióticos em uma mesma formulação, buscando efeito sinérgico ou complementar sobre a microbiota intestinal, seja pelo fornecimento simultâneo do micro-organismo benéfico e de seu substrato preferencial, seja pela combinação independente de ambos os componentes com benefícios distintos. A incorporação desses compostos, isolados ou combinados, a matrizes alimentares como laticínios, produtos de panificação, bebidas e sobremesas, tem sido apontada por revisões recentes como estratégia relevante para a indústria de alimentos funcionais, desde que respeitadas as particularidades de cada cepa probiótica e de cada substrato prebiótico utilizado (Gomes *et al.*, 2024).

Um dos principais desafios tecnológicos nessa área refere-se à manutenção da viabilidade de probióticos e à estabilidade de compostos bioativos frente às condições de processamento térmico, armazenamento prolongado e trânsito pelo trato gastrointestinal. Nesse contexto, técnicas de microencapsulação têm sido cada vez mais empregadas, utilizando materiais de parede como alginato de sódio, polissacarídeos, proteínas e seus complexos, com o objetivo de proteger fisicamente os micro-organismos ou os compostos bioativos até sua liberação no sítio de ação desejado. Revisão recente sistematizou os principais tipos de material encapsulante e as técnicas empregadas para a entrega de probióticos, destacando o uso de polissacarídeos e proteínas de origem vegetal e microbiana como alternativas promissoras aos materiais convencionais (Xie *et al.*, 2023).

Nesse cenário, ganha relevância também a possibilidade de aproveitamento de subprodutos e resíduos agroindustriais como fontes alternativas de substratos prebióticos e como materiais de parede para encapsulamento, alinhando o desenvolvimento de alimentos funcionais aos princípios da economia circular e da valorização de coprodutos da cadeia agroalimentar, tema que tem recebido atenção crescente em pesquisas voltadas à sustentabilidade da indústria de alimentos.

3.6 PERSPECTIVAS, DESAFIOS REGULATÓRIOS E DIREÇÕES FUTURAS

Apesar do robusto avanço científico observado na última meia década, persistem lacunas importantes quanto à padronização de cepas, doses e formas de administração de probióticos e pós-bióticos,

bem como quanto à harmonização regulatória entre diferentes países. Em muitos mercados, incluindo o brasileiro, o termo "prebiótico" ainda não é formalmente reconhecido em rotulagem de alimentos e suplementos, permanecendo tais substâncias amparadas, do ponto de vista regulatório, apenas pela categoria mais ampla de fibra alimentar funcional, o que evidencia um descompasso entre o avanço do conhecimento científico e a atualização dos marcos normativos aplicáveis.

Some-se a isso a necessidade de estudos clínicos randomizados de maior porte e de longo prazo, capazes de consolidar a relação causal entre a modulação da microbiota por prebióticos, probióticos e pós-bióticos e desfechos clínicos específicos, sobretudo no campo da saúde mental e das doenças neurodegenerativas, áreas ainda emergentes e com evidências predominantemente oriundas de estudos pré-clínicos ou de amostras clínicas reduzidas. Paralelamente, observa-se tendência crescente de investigação de probióticos de nova geração, como *Akkermansia muciniphila*, e de abordagens de nutrição personalizada baseadas no perfil individual da microbiota intestinal, o que deverá redefinir, nos próximos anos, os critérios de seleção e de aplicação desses compostos na indústria de alimentos e na prática clínica.

4 CONCLUSÃO

A revisão da literatura científica publicada entre 2021 e 2026 evidencia que a microbiota intestinal desempenha papel central na manutenção da homeostase metabólica, imunológica e neurológica do organismo humano, e que sua modulação por meio de prebióticos, probióticos e pós-bióticos representa uma das estratégias mais promissoras da ciência e tecnologia de alimentos aplicada à saúde humana na atualidade. Cada uma dessas categorias apresenta mecanismos de ação específicos a produção de ácidos graxos de cadeia curta a partir da fermentação prebiótica, a competição microbiana e a modulação imunológica exercidas pelos probióticos vivos, e a estabilidade tecnológica ampliada conferida pelos pós-bióticos, os quais se complementam e ampliam as possibilidades de aplicação em diferentes matrizes alimentares e populações-alvo.

Retomando os objetivos propostos, verificou-se que a disbiose intestinal está intimamente associada a distúrbios metabólicos, imunológicos e neuropsiquiátricos; que as definições de consenso da ISAPP para prebióticos e pós-bióticos consolidaram terminologias antes fragmentadas, conferindo maior rigor científico ao campo; que as evidências clínicas mais recentes reforçam o papel de cepas probióticas específicas na modulação do eixo intestino-cérebro; e que os desafios tecnológicos de encapsulamento e estabilidade permanecem centrais para a viabilização industrial desses ingredientes.

Como principais contribuições, o presente capítulo oferece uma síntese atualizada e integrada dessas três categorias de compostos, historicamente discutidas de forma fragmentada na literatura, favorecendo uma compreensão mais holística de suas potencialidades.

Sugere-se, para pesquisas futuras, a realização de ensaios clínicos randomizados de maior duração

e amostra, a exploração de subprodutos agroindustriais como fontes alternativas e sustentáveis de substratos prebióticos e de materiais de encapsulamento, bem como o acompanhamento da evolução regulatória nacional e internacional aplicável aos pós-bióticos, de modo a subsidiar o desenvolvimento seguro, eficaz e sustentável de alimentos funcionais voltados à promoção da saúde humana.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Nesse manuscrito para aprimorar a linguagem da escrita e revisão e apoio na redação foi utilizado a ferramenta de inteligência artificial Claude (Anthropic).

Todo o conteúdo científico foi supervisionado, revisado e validado pela autora, que assume total responsabilidade pela precisão, originalidade e integridade das informações apresentadas.

REFERÊNCIAS

ADITIVOS & INGREDIENTES. **Pós-bióticos**: a nova fronteira em aplicações alimentícias. Aditivos & Ingredientes, São Paulo, n. 149, mar. 2022. Disponível em: <https://funcionaisnutraceuticos.com/artigos/artigos-editoriais-geral/pos-bioticos-a-nova-fronteira-em-aplicacoes-alimenticias>. Acesso em: 17 jul. 2026.

BALASUBRAMANIAN, R.; SCHNEIDER, E.; GUNNIGLE, E.; COTTER, P. D.; CRYAN, J. F. Fermented foods: harnessing their potential to modulate the microbiota-gut-brain axis for mental health. **Neuroscience and Biobehavioral Reviews**, v. 158, e105562, 2024.

GIBSON, G. R.; HUTKINS, R.; SANDERS, M. E.; PRESCOTT, S. L.; REIMER, R. A.; SALMINEN, S. J.; SCOTT, K.; STANTON, C.; SWANSON, K. S.; CANI, P. D.; VERBEKE, K.; REID, G. Expert consensus document: the International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, v. 14, n. 8, p. 491-502, 2017.

GOMES, E. da S.; SCHIPFER, C. W. T.; OLIVEIRA, V. de A. F. de; FREITAS, M. M. G. de; MUXFELDT, L. C.; MAESTRO, A. D.; FREZ, F. L. V.; SANTOS JÚNIOR, O. de O. Alimentos funcionais integrados com prebióticos e probióticos: uma revisão. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 5, e4911, 2024.

HOLSCHER, H. D. Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota. **Gut Microbes**, v. 8, n. 2, p. 172-184, 2017.

JACH, M. E.; SEREFKO, A.; SZOPA, A.; SAJNAGA, E.; GOLCZYK, H.; SANTOS, L. S. The role of probiotics and their metabolites in the treatment of depression. **Molecules**, v. 28, n. 7, e3213, 2023.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE GASTROENTEROLOGIA. **Guia prático mundial da Organização Mundial de Gastroenterologia: probióticos e prebióticos**. Milwaukee: World Gastroenterology Organisation, 2023.

SALMINEN, S.; COLLADO, M. C.; ENDO, A.; HILL, C.; LEBEER, S.; QUIGLEY, E. M. M.; SANDERS, M. E.; SHAMIR, R.; SWANN, J. R.; SZAJEWSKA, H.; VINDEROLA, G. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, v. 18, n. 9, p. 649-667, 2021.

VINDEROLA, G.; SANDERS, M. E.; CUNNINGHAM, M.; HILL, C. Frequently asked questions about the ISAPP postbiotic definition. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, e1324565, 2024.

VINDEROLA, G.; SANDERS, M. E.; SALMINEN, S. The concept of postbiotics. **Foods**, v. 11, n. 8, e1077, 2022.

WANG, K.; DUAN, F.; SUN, T.; ZHANG, Y.; LU, L. **Galactooligosaccharides**: synthesis, metabolism, bioactivities and food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023.

XIE, A.; ZHAO, S.; LIU, Z.; LIANG, X.; LI, M.; LIANG, X.; LI, Z. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: a review on carrier types and encapsulation techniques. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, e124784, 2023.

ZHANG, X.; CHEN, S.; ZHANG, M.; REN, F.; REN, Y.; LI, Y. Effects of fermented milk containing *Lactobacillus paracasei* strain Shirota on constipation in patients with depression: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. **Journal of Affective Disorders**, v. 327, p. 425-438, 2023.

CAPÍTULO 12

EIXO INTESTINO-CÉREBRO: ALIMENTOS E SAÚDE MENTAL

GUT-BRAIN AXIS: FOOD AND MENTAL HEALTH

 <https://doi.org/10.63330/livroautoral822026-012>

Resumo

O eixo intestino-cérebro (EIC) constitui um sistema de comunicação bidirecional que integra sinais neurais, endócrinos, imunológicos e metabólicos entre o trato gastrointestinal e o sistema nervoso central. Esta revisão narrativa da literatura teve como objetivo sintetizar os principais mecanismos que sustentam essa comunicação, os neurotransmissores e metabólitos microbianos envolvidos, e o papel de padrões alimentares, alimentos funcionais e compostos bioativos na modulação do eixo. Foram consultadas as bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO, priorizando estudos pré-clínicos, ensaios clínicos randomizados, revisões sistemáticas e metanálises publicados até 2025. Os resultados evidenciam que a composição da microbiota intestinal exerce influência direta sobre o comportamento, o humor e a cognição, com implicações clínicas relevantes para depressão, ansiedade, transtorno do espectro autista e doença de Alzheimer. Conclui-se que a dieta e a microbiota intestinal constituem determinantes modificáveis da saúde mental, ainda que persistam lacunas metodológicas quanto à padronização de protocolos e à tradução clínica dessas evidências.

Palavras-chave: Eixo intestino-cérebro; Microbiota; Neuronutrição; Psicobióticos; Saúde mental.

Abstract

The gut-brain axis (GBA) is a bidirectional communication system that integrates neural, endocrine, immune, and metabolic signals between the gastrointestinal tract and the central nervous system. This narrative literature review aimed to synthesize the main mechanisms underlying this communication, the relevant neurotransmitters and microbial metabolites, and the role of dietary patterns, functional foods, and bioactive compounds in modulating the axis. The PubMed, Scopus, Web of Science, and SciELO databases were consulted, prioritizing preclinical studies, randomized clinical trials, systematic reviews, and meta-analyses published up to 2025. The results show that gut microbiota composition directly influences behavior, mood, and cognition, with relevant clinical implications for depression, anxiety, autism spectrum disorder, and Alzheimer's disease. It is concluded that diet and gut microbiota are modifiable determinants of mental health, although methodological gaps remain regarding protocol standardization and the clinical translation of this evidence.

Keywords: Gut-brain axis; Mental health; Microbiota; Neuronutrition; Psychobiotics.

1 INTRODUÇÃO

A relação entre alimentação e saúde mental transcende a simples provisão de substratos energéticos ao sistema nervoso central. Durante as últimas duas décadas, a neurociência nutricional emergiu como campo disciplinar autônomo, consolidando evidências de que nutrientes, padrões alimentares e a microbiota intestinal modulam ativamente a neuroquímica, a neuroinflamação e a plasticidade sináptica. O conceito de eixo intestino-cérebro (EIC), antes restrito a reflexos enterais e regulação da motilidade, ganhou significado ampliado ao incorporar o papel dos trilhões de microrganismos que habitam o trato gastrointestinal humano como participantes ativos do eixo de comunicação (Cryan *et al.*, 2019).

Estimativas recentes apontam que distúrbios mentais afetam mais de um bilhão de pessoas no mundo, representando a principal causa de incapacidade funcional em adultos jovens, com a depressão unipolar entre as principais causas globais de anos vividos com incapacidade e os transtornos de ansiedade entre os mais prevalentes em todas as faixas etárias (Rechenberg, 2016). Diante da eficácia limitada de intervenções farmacológicas exclusivas e do crescente interesse em abordagens integrativas, a modulação do EIC por meio da dieta apresenta-se como estratégia promissora, com potencial preventivo e adjuvante ao tratamento convencional (Sarris *et al.*, 2015).

Este capítulo discute os fundamentos anatômicos e funcionais do EIC, os mecanismos pelos quais a dieta e a microbiota influenciam o sistema nervoso central, e as evidências clínicas que sustentam o desenvolvimento de intervenções nutricionais voltadas à saúde mental (FIRTH *et al.*, 2019). A abordagem é multidisciplinar, integrando microbiologia, neurofisiologia, imunologia e ciência dos alimentos em uma perspectiva aplicada à nutrição humana.

2 METODOLOGIA

Este capítulo foi desenvolvido a partir de uma revisão narrativa da literatura científica sobre o eixo intestino-cérebro e suas interfaces com a alimentação e a saúde mental. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO, utilizando os descritores “gut-brain axis”, “microbiota”, “psychobiotics”, “nutritional psychiatry”, “prebiotics” e “probiotics”, isolados e combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR.

Foram priorizados estudos pré-clínicos, ensaios clínicos randomizados, revisões sistemáticas e metanálises publicados em periódicos revisados por pares até 2025, em português e inglês, excluindo-se materiais sem revisão por pares, resumos de congresso e fontes de divulgação não científica. O conteúdo selecionado foi organizado tematicamente, contemplando a anatomia funcional do eixo, a microbiota intestinal e seus metabólitos, os padrões alimentares, os compostos bioativos e psicobióticos, as implicações

clínicas em transtornos específicos de saúde mental, e as perspectivas terapêuticas emergentes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANATOMIA FUNCIONAL DO EIXO INTESTINO-CÉREBRO

3.1.1 O Sistema Nervoso Entérico

O sistema nervoso entérico (SNE) é uma rede neural intrinsecamente organizada na parede do trato gastrointestinal, composta por aproximadamente 500 milhões de neurônios distribuídos nos plexos mioentérico (de Auerbach) e submucoso (de Meissner). Frequentemente denominado “segundo cérebro”, o SNE opera com relativa autonomia em relação ao sistema nervoso central, sendo capaz de coordenar reflexos de motilidade, secreção e absorção de forma independente. Contudo, sua integração com o SNC é mediada principalmente pelo nervo vago, cujas fibras aferentes conduzem cerca de 80 a 90% do fluxo de informações do intestino ao encéfalo, evidenciando a predominância da comunicação ascendente nesse eixo (Carabotti *et al.*, 2015).

A vagotomia subdiafragmática em modelos murinos demonstra que muitos dos efeitos comportamentais atribuídos à microbiota intestinal dependem da integridade do nervo vago, sugerindo que os sinais microbianos são primariamente transduzidos por células enteroendócrinas e neurônios do SNE antes de atingir o SNC via vias vagais (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021). Essa descoberta tem implicações diretas para o desenvolvimento de alimentos e bioativos com ação psicotrópica mediada por via intestinal.

3.1.2 Vias de Comunicação do Eixo

A comunicação bidirecional no EIC ocorre por meio de quatro grandes vias, frequentemente simultâneas e interdependentes (Carabotti *et al.*, 2015; Cryan *et al.*, 2019), conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais vias de comunicação do eixo intestino-cérebro

Via	Descrição
Neural	Nervo vago e neurônios do sistema nervoso entérico transmitem sinais elétricos e peptídeos entre intestino e encéfalo.
Endócrina	Células enteroendócrinas secretam hormônios como GLP-1, PYY, grelina e serotonina, que atuam local e sistemicamente.
Imunológica	Citocinas pró e anti-inflamatórias liberadas pela mucosa intestinal modulam a neuroinflamação central por meio da barreira hematoencefálica.
Metabólica	Metabólitos produzidos pela microbiota (AGCC, ácidos biliares secundários, triptofano e seus metabólitos) atuam sobre receptores neuronais e endócrinos.

Fonte: elaborado pela autora com base em Carabotti *et al.* (2015) e Cryan *et al.* (2019).

3.1.3 a barreira intestinal e a barreira hematoencefálica

A integridade das barreiras intestinal e hematoencefálica (BHE) é determinante para a homeostase do EIC. A barreira intestinal, composta por enterócitos interligados por proteínas de junção estreita (occludina, claudinas, ZO-1), regula a permeabilidade seletiva entre o lúmen intestinal e a circulação sistêmica. Sua disfunção, denominada “intestino hiperpermeável” (leaky gut), permite a translocação de lipopolissacarídeos bacterianos para a corrente sanguínea, induzindo endotoxemia metabólica e ativação imune sistêmica que, por sua vez, comprometem a integridade da BHE e favorecem a neuroinflamação (Cryan *et al.*, 2019).

Dietas ricas em gorduras saturadas e açúcares refinados aumentam a permeabilidade intestinal ao alterar a composição da microbiota e reduzir a produção de muco e ácidos graxos de cadeia curta (AGCC). Por outro lado, dietas ricas em fibras fermentáveis, polifenóis e ácidos graxos ômega-3 fortalecem ambas as barreiras, constituindo estratégias nutricionais com potencial neuroprotetor (Silva; Bernardi; Frozza, 2020).

3.2 MICROBIOTA INTESTINAL E NEUROMODULAÇÃO

3.2.1 Composição da Microbiota e Eixo Cérebro-Intestino-Microbiota

O conceito de eixo intestino-cérebro evoluiu para o de eixo cérebro-intestino-microbiota, reconhecendo a microbiota como terceiro componente ativo do sistema (SONNENBURG; BACKHED, 2016). O microbioma intestinal humano adulto é dominado pelos filos Bacteroidota e Firmicutes, com contribuições variáveis de Actinobacteriota, Proteobacteria e Verrucomicrobiota. A diversidade alfa e a diversidade beta são marcadores de saúde, com reduções associadas a transtornos de humor, obesidade, síndrome metabólica e doenças neurodegenerativas (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021).

Estudos com animais livres de germes (germ-free) demonstraram que a ausência de microbiota resulta em alterações comportamentais significativas, incluindo redução da ansiedade e prejuízo na resposta ao estresse, evidências revertidas pela colonização bacteriana em períodos sensíveis do desenvolvimento. A colonização com microbiota de doadores com depressão transferiu fenótipos depressivos a roedores receptores, estabelecendo causalidade e abrindo caminho para intervenções baseadas em transplante de microbiota fecal e psicobióticos (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021).

3.2.2 Produção de Neurotransmissores e Precursores

A microbiota intestinal participa ativamente da síntese e metabolização de neurotransmissores ou de seus precursores. Esse aspecto é de particular relevância dado que aproximadamente 95% da serotonina corporal é produzida por células enterocromafins do intestino, sob influência direta de bactérias do gênero *Clostridium*, *Ruminococcus* e algumas espécies de *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*. A serotonina intestinal

regula a motilidade, a secreção e a percepção visceral, além de modular o humor por vias vagais ascendentes (Lach *et al.*, 2018; Cryan *et al.*, 2019), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais neurotransmissores e precursores modulados pela microbiota intestinal

Neurotransmissor/Precursor	Bactérias Envolvidas	Mecanismo de Ação
Serotonina (5-HT)	Enterococcus, Lactobacillus, Clostridium	Estimulam células enterocromafins via AGCC e ácidos biliares secundários
GABA	Lactobacillus rhamnosus, L. brevis	Síntese direta via glutamato descarboxilase bacteriana
Dopamina	Bacillus subtilis, Serratia	Síntese de levodopa como precursor sistêmico
Norepinefrina	Escherichia, Bacillus	Conversão de tirosina via enzimas bacterianas
Acetilcolina	Lachnospiraceae	Produção de colina como precursor
BDNF (indiretamente)	Lactobacillus helveticus, B. longum	Estímulo da expressão via redução de cortisol e inflamação

Fonte: elaborado pela autora com base em Lach *et al.* (2018) e Cryan *et al.* (2019). AGCC: ácidos graxos de cadeia curta; BDNF: fator neurotrófico derivado do encéfalo; GABA: ácido γ -aminobutírico.

3.2.3 Ácidos Graxos de Cadeia Curta (AGCC) e Neuromodulação

Os AGCC principalmente acetato, propionato e butirato são os principais metabólitos produzidos pela fermentação bacteriana de fibras alimentares no cólon. O butirato, em especial, exerce papel central no EIC: serve como substrato energético preferencial dos colonócitos, reforça a barreira intestinal ao aumentar a expressão de proteínas de junção estreita, e exerce atividade inibidora de histona deacetilases, modulando epigeneticamente a expressão gênica em células imunes e neuronais (Silva; Bernardi; Frozza, 2020).

No SNC, o butirato atravessa a BHE e atua como neuroprotetor ao inibir a neuroinflamação mediada por NF- κ B, estimular a neurogênese hipocampal dependente de BDNF e reduzir a ativação microglial. Ensaios pré-clínicos com suplementação de butirato ou com dietas enriquecidas em fibras fermentáveis demonstraram atenuação de fenótipos depressivos e ansiosos em modelos de estresse crônico, com efeitos dependentes da produção endógena de AGCC pela microbiota (Silva; Bernardi; Frozza, 2020).

3.2.4 Eixo HPA, Cortisol e Microbiota

O eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HPA), principal mediador da resposta ao estresse, é significativamente modulado pela microbiota intestinal. Animais germ-free exibem hiperreatividade do eixo HPA ao estresse, com maior liberação de cortisol e comportamentos ansiosos, que são normalizados pela colonização com *Bifidobacterium infantis* nos primeiros dias de vida (Foster; Rinaman; Cryan, 2017).

A microbiota regula o eixo HPA por múltiplas vias, incluindo a produção de metabólitos que ativam o nervo vago, a modulação de citocinas pró-inflamatórias (IL-1 β , IL-6, TNF- α) e a síntese de metabólitos

do triptofano, como a quinurenina, cujas concentrações elevadas estão associadas à depressão e à neuroinflamação (Zmora *et al.*, 2018).

3.3 DIETA, PADRÕES ALIMENTARES E SAÚDE MENTAL

3.3.1 Estudos Epidemiológicos e Prospectivos

Evidências epidemiológicas consistentes associam padrões alimentares de baixa qualidade — caracterizados pelo consumo elevado de alimentos ultraprocessados, gorduras saturadas, açúcares livres e sódio — com maior prevalência de depressão, ansiedade e declínio cognitivo (Rechenberg, 2016). Em contraste, padrões alimentares tradicionais, como a dieta mediterrânea, a dieta MIND e a dieta japonesa tradicional, correlacionam-se inversamente com a incidência de transtornos mentais em estudos de coorte de grande escala (Firth *et al.*, 2019).

O estudo SMILES (Supporting the Modification of Lifestyle in Lowered Emotional States), publicado em 2017, foi o primeiro ensaio clínico randomizado e controlado a demonstrar que uma intervenção dietética de 12 semanas baseada na dieta mediterrânea reduziu significativamente os escores de depressão em adultos com depressão maior moderada a severa, com tamanho de efeito superior ao observado no grupo de suporte social. A proporção de participantes que atingiu remissão clínica foi de 32,3% no grupo dieta versus 8,0% no grupo controle, resultados que inauguraram o campo da psiquiatria nutricional como especialidade baseada em evidências (Jacka *et al.*, 2017).

3.3.2 Dieta Mediterrânea e Neuroproteção

A dieta mediterrânea caracteriza-se pelo consumo abundante de vegetais, leguminosas, cereais integrais, frutas, azeite de oliva extravirgem, peixe e moderado de vinho tinto, com baixo consumo de carnes vermelhas e laticínios integrais. Do ponto de vista do EIC, esse padrão favorece a diversidade da microbiota intestinal ao fornecer elevada quantidade e variedade de fibras fermentáveis e compostos fenólicos (Sonnenburg; Backhed, 2016). Estudos comparativos demonstraram que populações aderentes a esse padrão alimentar apresentam maior abundância de *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Faecalibacterium prausnitzii* e *Roseburia intestinalis* todas produtoras de butirato ou com propriedades anti-inflamatórias em comparação a populações com padrão alimentar ocidental (Oriach *et al.*, 2016).

Mecanicamente, a dieta mediterrânea reduz a neuroinflamação ao diminuir os níveis circulantes de proteína C reativa, IL-6 e TNF- α ; aumenta a produção de AGCC; fornece ácidos graxos ômega-3 (EPA e DHA) que competem com o ácido araquidônico pela produção de eicosanoides anti-inflamatórios; e oferece ampla gama de polifenóis com atividade antioxidante e moduladora da microbiota (Oriach *et al.*, 2016).

3.3.3 Alimentos Ultraprocessados e Disrupção do EIC

Os alimentos ultraprocessados (AUPs), conforme classificação NOVA, são formulações industriais compostas primariamente de ingredientes extraídos de alimentos e de aditivos tecnológicos e cosméticos (emulsificantes, espessantes, corantes, aromatizantes artificiais). O consumo de AUPs está associado de forma independente ao risco aumentado de depressão, conforme demonstrado em metanálises recentes envolvendo mais de 300 mil participantes (Oriach *et al.*, 2016).

Os mecanismos propostos incluem: disrupção da microbiota intestinal por emulsificantes como carboximetilcelulose e polissorbat-80, que reduzem a camada de muco e aumentam a permeabilidade intestinal; elevação do índice glicêmico e carga glicêmica da dieta, promovendo hiperglicemia pós-prandial recorrente e inflamação sistêmica; deficiência induzida de micronutrientes essenciais para a neurosíntese, como magnésio, zinco, folato e vitaminas B6 e B12; e inibição da produção de AGCC por redução do consumo de fibras fermentáveis (Wastyk *et al.*, 2021).

3.4 COMPOSTOS BIOATIVOS E PSICOBÍOTICOS

3.4.1 Probióticos com Ação Psicotrópica (Psicobióticos)

O termo psicobiótico, proposto em 2013, refere-se originalmente a probióticos que, consumidos em quantidades adequadas, produzem benefícios à saúde mental em pacientes com transtornos psiquiátricos. O conceito foi posteriormente ampliado para incluir prebióticos e outras intervenções sobre a microbiota com efeitos cognitivos e comportamentais, abrangendo atualmente qualquer intervenção exógena cujo efeito sobre a saúde mental seja mediado, ao menos parcialmente, pelo microbioma intestinal (Dinan; Stanton; Cryan, 2013).

Estudos clínicos com *Lactobacillus rhamnosus* JB-1 demonstraram redução de comportamentos ansiosos em modelos murinos e, em voluntários humanos saudáveis, atenuação da resposta de cortisol ao estresse e melhora de escores de humor. A combinação de *L. helveticus* R0052 e *B. longum* R0175 reduziu ansiedade e sintomas somatoativos em ensaio clínico duplo-cego, e em pacientes com síndrome do intestino irritável e comorbidade depressiva, *B. longum* NCC3001 reduziu escores de depressão associados à normalização da atividade de regiões límbicas em exame de imagem funcional, indicando efeito central mensurável (Zmora *et al.*, 2018).

3.4.2 Prebióticos e Modulação do Humor

Prebióticos são substratos não digestíveis fermentados seletivamente pela microbiota do hospedeiro, conferindo benefícios à saúde. Frutooligossacarídeos, galactooligossacarídeos, inulina e beta-glucanas são os prebióticos mais estudados no contexto do EIC (Wastyk *et al.*, 2021). Em voluntários saudáveis, a suplementação de galactooligossacarídeos por três semanas reduziu a atenção seletiva a estímulos negativos

marcador de viés cognitivo associado à ansiedade e os níveis salivares de cortisol ao despertar, efeitos atribuídos ao aumento de *Bifidobacterium* e à maior produção de AGCC (Lach *et al.*, 2018).

A administração de frutooligossacarídeos em indivíduos com depressão subclínica aumentou a razão *Bacteroidetes:Firmicutes* e reduziu escores de ansiedade em quatro semanas, sem efeitos adversos registrados, resultados que sustentam o potencial dos prebióticos como intervenção de baixo custo e elevada segurança para a saúde mental (Lach *et al.*, 2018).

3.4.3 Polifenóis e Eixo Intestino-Cérebro

Os polifenóis representam a maior classe de fitoquímicos bioativos na dieta humana, com mais de 8.000 estruturas identificadas em alimentos de origem vegetal. Sua biodisponibilidade é altamente variável e determinada em grande parte pela biotransformação realizada pela microbiota intestinal: compostos como antocianinas, quercetina, resveratrol e isoflavonas são convertidos pela microbiota em metabólitos bioativos com maior atividade biológica sistêmica, como a urolitina A, o equol e ácidos fenólicos de cadeia curta (Oriach *et al.*, 2016).

No contexto do EIC, os polifenóis exercem efeitos prebióticos seletivos ao estimular o crescimento de *Bifidobacterium*, *Lactobacillus* e *Akkermansia muciniphila*, enquanto suprimem patobiontes como *Clostridium difficile* e certas *Enterobacteriaceae*, além de exercerem atividade antioxidante e anti-inflamatória direta no SNC, inibindo a ativação microglial e a produção de espécies reativas de oxigênio em neurônios hipocâmpais (Silva; Bernardi; Frozza, 2020).

3.4.4 Ácidos Graxos Ômega-3 e Neurogênese

O ácido eicosapentaenoico (EPA) e o ácido docosahexaenoico (DHA), ácidos graxos poli-insaturados de cadeia longa da família ômega-3 presentes principalmente em peixes marinhos, algas e óleos de microalgas, são componentes essenciais das membranas neuronais e precursores de mediadores lipídicos anti-inflamatórios. Metanálises de ensaios clínicos indicam que a suplementação de EPA, em formulações com predomínio de EPA sobre DHA, apresenta eficácia significativa como adjuvante no tratamento da depressão maior, com efeito comparável ao de alguns antidepressivos em pacientes com quadros leve a moderado (Firth *et al.*, 2019).

O ômega-3 também modula positivamente o EIC ao aumentar a produção de AGCC, aumentar a expressão de proteínas de junção estreita na barreira intestinal e reduzir os níveis de lipopolissacarídeos circulantes. Em idosos, a suplementação de DHA foi associada à preservação do volume hipocâmpal e à redução do declínio cognitivo em estudos de acompanhamento de até 18 meses, com efeito potencializado pela dieta mediterrânea concomitante (Oriach *et al.*, 2016).

3.5 EIXO INTESTINO-CÉREBRO EM TRANSTORNOS ESPECÍFICOS DE SAÚDE MENTAL

3.5.1 Depressão Maior

A depressão maior é um transtorno heterogêneo, com subtipos imunometabólicos caracterizados por elevação de marcadores inflamatórios, resistência à insulina e disbiose intestinal que podem responder de forma diferenciada a intervenções dietéticas. Pacientes deprimidos apresentam, consistentemente, menor diversidade alfa da microbiota, redução de *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* e *Faecalibacterium prausnitzii* e aumento de *Alistipes*, *Proteobacteria* e *Eggerthella*. O transplante de microbiota fecal de pacientes deprimidos para roedores germ-free transmitiu fenótipos depressivos e ansiosos, consolidando o papel causal da microbiota nesse transtorno (Jacka *et al.*, 2017; Lach *et al.*, 2018).

3.5.2 Ansiedade

Os transtornos de ansiedade representam as condições psiquiátricas mais prevalentes globalmente, afetando cerca de 284 milhões de pessoas. O papel do EIC na ansiedade é mediado principalmente pela modulação do eixo HPA, pela produção intestinal de GABA e pela regulação da sensibilidade do sistema nervoso autônomo (Lach *et al.*, 2018). Intervenções com *L. rhamnosus* JB-1 reduziram a expressão de comportamentos ansiosos em camundongos de forma dependente do nervo vago, e a suplementação de uma mistura probiótica por oito semanas reduziu significativamente escores do Inventário de Ansiedade de Beck em pacientes com síndrome metabólica (Foster; Rinaman; Cryan, 2017).

3.5.3 Transtorno do Espectro Autista (TEA)

O TEA apresenta elevada prevalência de comorbidades gastrointestinais (50 a 90% dos casos, dependendo do estudo), e a disbiose intestinal tem sido documentada consistentemente nessa população, com redução de *Prevotella*, *Coprococcus* e *Veillonellaceae* e elevação de *Clostridium* e *Faecalibacterium*. A hipótese microbiana do TEA propõe que metabólitos bacterianos como o ácido propiônico, produzido em excesso por *Clostridium* e *Bacteroides*, atravessem a BHE e interfiram na sinalização dopaminérgica e mitocondrial em neurônios do desenvolvimento (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021).

Ensaio clínico com transplante de microbiota fecal em crianças com TEA demonstraram melhora sustentada de sintomas gastrointestinais e, secundariamente, de escores comportamentais em seguimentos de dois anos, com persistência das mudanças na microbiota. Intervenções dietéticas com exclusão de caseína e glúten mostraram resultados contraditórios em ensaios clínicos, mas dietas ricas em fermentados e prebióticos apresentam evidências preliminares positivas, justificando estudos de maior porte (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021).

3.5.4 Doença de Alzheimer e Neuroinflamação

As doenças neurodegenerativas, em particular a doença de Alzheimer, partilham com os transtornos do humor o substrato da neuroinflamação crônica e da disfunção mitocondrial. A microbiota de pacientes com essa doença apresenta redução de *Eubacterium rectale* e *Bifidobacterium* e aumento de *Escherichia/Shigella*, *Bacteroides* e *Alistipes*, padrão associado à elevação de citocinas pró-inflamatórias no liquor e à maior carga amiloide cerebral (Cryan *et al.*, 2019).

Modelos murinos transgênicos mostraram que a colonização com microbiota de animais saudáveis reduziu a deposição de beta-amiloide e melhorou a performance cognitiva, reforçando a participação microbiana na patofisiologia da doença. Compostos bioativos como resveratrol, curcumina, EGCG, ácidos graxos ômega-3 e vitamina D têm sido estudados no contexto da prevenção e progressão dessa condição, com mecanismos que incluem modulação da microbiota, redução da neuroinflamação e estímulo à autofagia neuronal (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021).

3.6 PERSPECTIVAS TERAPÊUTICAS: DA DIETA ÀS INTERVENÇÕES DE PRECISÃO

3.6.1 Nutrição Psiquiátrica de Precisão

O avanço do sequenciamento metagenômico de nova geração e das técnicas de metabolômica permitiu a caracterização detalhada do microbioma intestinal individual e a identificação de assinaturas metabólicas associadas a fenótipos psiquiátricos específicos, viabilizando o desenvolvimento da nutrição psiquiátrica de precisão (Sarris *et al.*, 2015).

Projetos que integram dados do microbioma, genômica do hospedeiro e histórico dietético demonstraram elevada variabilidade interindividual nas respostas glicêmicas, lipídicas e inflamatórias a alimentos idênticos, determinada em parte pela composição da microbiota. Algoritmos baseados em aprendizado de máquina que integram esses dados já mostraram superioridade sobre recomendações dietéticas populacionais na predição da resposta glicêmica individual, modelo que começa a ser aplicado a desfechos de saúde mental (Zmora *et al.*, 2018).

3.6.2 Transplante de Microbiota Fecal (TMF) e Pós-bióticos

O TMF, consolidado no tratamento de infecção recorrente por *Clostridioides difficile* com taxas de sucesso superiores a 90%, encontra-se em fase de investigação para aplicações em saúde mental, com ensaios clínicos de fase 2 em depressão, TEA, síndrome do intestino irritável com comorbidade psiquiátrica e doença de Parkinson em andamento em múltiplos centros (Morais; Schreiber; Mazmanian, 2021).

Os pós-bióticos, definidos por Salminen *et al.* (2021) como preparações de microrganismos inanimados e/ou seus componentes que conferem benefícios à saúde do hospedeiro, representam alternativa com maior estabilidade e segurança em relação aos probióticos vivos. Células bacterianas inativadas por

calor, fragmentos de parede celular, vesículas de membrana externa e metabólitos purificados como butirato encapsulado são investigados no contexto de formulações funcionais para saúde mental (Silva; Bernardi; Frozza, 2020).

3.6.3 Alimentos Fermentados Tradicionais e Saúde Mental

O interesse nos alimentos fermentados tradicionais como fonte de psicobióticos renasceu com a compreensão do EIC. Kefir, kombucha, iogurtes artesanais, kimchi, miso, tempeh e queijos maturados são matrizes complexas que contêm microrganismos vivos, metabólitos bacterianos, compostos bioativos derivados da fermentação e substratos prebióticos. Um ensaio clínico randomizado de quatro semanas com consumo de dieta rica em alimentos fermentados versus dieta rica em fibras demonstrou que os fermentados aumentaram mais rapidamente a diversidade do microbioma e reduziram marcadores de inflamação sistêmica, sugerindo efeito imunomodulador clinicamente relevante (Wastyk *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, fermentados tradicionais como o kefir de leite, o iogurte natural, o pão de fermentação natural (levain) e as bebidas fermentadas à base de frutas regionais representam fontes acessíveis e culturalmente integradas de modulação do EIC.

4 CONCLUSÃO

O eixo intestino-cérebro representa uma das fronteiras mais férteis da biociência contemporânea, com implicações profundas para a compreensão e o manejo dos transtornos mentais. As evidências acumuladas nas últimas duas décadas permitem afirmar, com grau razoável de certeza, que a dieta e a microbiota intestinal são determinantes modificáveis da saúde mental, atuando por mecanismos neurais, endócrinos, imunológicos e metabólicos interdependentes.

Contudo, persistem lacunas metodológicas e conceituais que demandam investigação. A maioria dos ensaios clínicos com psicobióticos apresenta tamanhos amostrais reduzidos, curto período de seguimento e heterogeneidade nos desfechos avaliados. A causalidade reversa — indivíduos deprimidos adotando padrões alimentares piores permanece um viés difícil de controlar completamente em estudos observacionais, e a regulamentação de alegações de saúde mental para alimentos funcionais e psicobióticos permanece incipiente na maioria das jurisdições, incluindo o Brasil.

O caminho à frente passa pela integração de dados multiômicos em larga escala, pelo desenvolvimento de ensaios clínicos com padronização metodológica robusta e pelos avanços na tecnologia de alimentos para formulação de produtos que combinem eficácia psicobiótica, praticidade, palatabilidade e custo acessível. A colaboração entre nutrólogos, psiquiatras, gastroenterologistas, tecnólogos de alimentos e microbiologistas será determinante para traduzir os conhecimentos do EIC em estratégias preventivas e terapêuticas de impacto populacional.

REFERÊNCIAS

- CARABOTTI, M. et al. The gut–brain axis: interactions between enteric microbiota, central and enteric nervous systems. **Annals of Gastroenterology**, v. 28, n. 2, p. 203–209, 2015.
- CRYAN, J. F. et al. The microbiota–gut–brain axis. **Physiological Reviews**, v. 99, n. 4, p. 1877–2013, 2019.
- DINAN, T. G.; STANTON, C.; CRYAN, J. F. Psychobiotics: a novel class of psychotropic. **Biological Psychiatry**, v. 74, n. 10, p. 720–726, 2013.
- FIRTH, J. et al. The effects of dietary improvement on symptoms of depression and anxiety: a meta-analysis of randomized controlled trials. **Psychosomatic Medicine**, v. 81, n. 3, p. 265–280, 2019.
- FOSTER, J. A.; RINAMAN, L.; CRYAN, J. F. Stress & the gut–brain axis: regulation by the microbiome. **Neurobiology of Stress**, v. 7, p. 124–136, 2017.
- JACKA, F. N. et al. A randomised controlled trial of dietary improvement for adults with major depression (the 'SMILES' trial). **BMC Medicine**, v. 15, n. 23, 2017.
- LACH, G. et al. Anxiety, depression, and the microbiome: a role for gut peptides. **Neurotherapeutics**, v. 15, n. 1, p. 36–59, 2018.
- MORAIS, L. H.; SCHREIBER, H. L.; MAZMANIAN, S. K. The gut microbiota–brain axis in behaviour and brain disorders. **Nature Reviews Microbiology**, v. 19, p. 241–255, 2021.
- ORIACH, C. S. et al. Food for thought: the role of nutrition in the microbiota–gut–brain axis. **Clinical Nutrition Experimental**, v. 6, p. 25–38, 2016.
- RECHENBERG, K. Nutritional interventions in clinical depression. **Clinical Psychological Science**, v. 4, n. 1, p. 144–162, 2016.
- SALMINEN, S. et al. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, v. 18, n. 9, p. 649–667, 2021.
- SARRIS, J. et al. Nutritional medicine as mainstream in psychiatry. **Lancet Psychiatry**, v. 2, n. 3, p. 271–274, 2015.
- SILVA, Y. P.; BERNARDI, A.; FROZZA, R. L. The role of short-chain fatty acids from gut microbiota in gut–brain communication. **Frontiers in Endocrinology**, v. 11, p. 25, 2020.
- SONNENBURG, J. L.; BACKHED, F. Diet–microbiota interactions as moderators of human metabolism. **Nature**, v. 535, p. 56–64, 2016.
- WASTYK, H. C. et al. Gut-microbiota-targeted diets modulate human immune status. **Cell**, v. 184, n. 16, p. 4137–4153, 2021.

ZMORA, N. et al. Personalized gut mucosal colonization resistance to empiric probiotics is associated with unique host and microbiome features. **Cell**, v. 174, n. 6, p. 1388–1405, 2018.

CAPÍTULO 13

ALIMENTAÇÃO DO IDOSO: SARCOPENIA, DESNUTRIÇÃO E ADEQUAÇÃO NUTRICIONAL

NUTRITION IN OLDER ADULTS: SARCOPENIA, MALNUTRITION AND NUTRITIONAL ADEQUACY

 <https://doi.org/10.63330/livroautor822026-013>

Resumo

O envelhecimento populacional acentua a relevância de duas síndromes nutricionais intimamente relacionadas: a sarcopenia e a desnutrição. Esta revisão narrativa da literatura teve como objetivo sintetizar as evidências científicas publicadas entre 2021 e 2025 sobre os critérios diagnósticos, a prevalência e as estratégias nutricionais para prevenção e tratamento da sarcopenia e da desnutrição em pessoas idosas, bem como discutir a adequação proteica, os micronutrientes envolvidos e os padrões alimentares protetores. Foram consultadas as bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO, priorizando revisões sistemáticas, metanálises e estudos de coorte publicados no período. Os resultados indicam que a sarcopenia e a desnutrição frequentemente coexistem com a obesidade sarcopênica, compartilhando determinantes como baixa ingestão proteica, inflamação crônica e insegurança alimentar. A adequação da ingestão de proteínas, leucina e vitamina D, associada a padrões alimentares saudáveis e à prática de exercício físico, mostra-se central na prevenção e no manejo dessas condições. Conclui-se que a triagem nutricional sistemática e o cuidado nutricional individualizado e multiprofissional são essenciais para preservar a funcionalidade e a qualidade de vida da população idosa.

Palavras-chave: Adequação nutricional; Desnutrição; Envelhecimento; Nutrição do idoso; Sarcopenia.

Abstract

Population aging highlights the relevance of two closely related nutritional syndromes: sarcopenia and malnutrition. This narrative literature review aimed to synthesize scientific evidence published between 2021 and 2025 on the diagnostic criteria, prevalence, and nutritional strategies for the prevention and treatment of sarcopenia and malnutrition in older adults, as well as to discuss protein adequacy, relevant micronutrients, and protective dietary patterns. The PubMed, Scopus, Web of Science, and SciELO databases were consulted, prioritizing systematic reviews, meta-analyses, and cohort studies published during this period. The results indicate that sarcopenia and malnutrition frequently coexist with sarcopenic obesity, sharing determinants such as low protein intake, chronic inflammation, and food insecurity. Adequate intake of protein, leucine, and vitamin D, combined with healthy dietary patterns and physical exercise, appears central to the prevention and management of these conditions. It is concluded that systematic nutritional

screening and individualized, multiprofessional nutritional care are essential to preserve functionality and quality of life in the older population.

Keywords: Aging; Malnutrition; Nutritional adequacy; Older adult nutrition; Sarcopenia.

1 INTRODUÇÃO

O envelhecimento populacional é um fenômeno global e acelerado, com projeções indicando aumento expressivo da proporção de pessoas com 60 anos ou mais nas próximas décadas. Esse processo demográfico é acompanhado por transformações fisiológicas que afetam diretamente o estado nutricional, entre as quais se destacam a perda progressiva de massa e função muscular denominada sarcopenia e o risco aumentado de desnutrição, condições que frequentemente coexistem e se potencializam mutuamente (Prado *et al.*, 2024).

A sarcopenia e a desnutrição compartilham determinantes fisiopatológicos, como a redução da ingestão alimentar, a inflamação crônica de baixo grau e a inatividade física, e ambas estão associadas a desfechos clínicos adversos, incluindo quedas, fragilidade, hospitalização, perda de independência funcional e mortalidade (Yeung *et al.*, 2021). Mais recentemente, o reconhecimento da obesidade sarcopênica como fenótipo distinto ampliou a complexidade do cuidado nutricional ao idoso, exigindo abordagens diagnósticas e terapêuticas específicas (Donini *et al.*, 2022).

Este capítulo tem como objetivo discutir os critérios atuais de diagnóstico da sarcopenia e da desnutrição, sua prevalência na população idosa, e as estratégias nutricionais com ênfase na adequação proteica, em micronutrientes relevantes e em padrões alimentares saudáveis voltadas à prevenção e ao tratamento dessas condições, com base em evidências científicas publicadas a partir de 2021.

2 METODOLOGIA

Este capítulo foi elaborado a partir de uma revisão narrativa da literatura científica sobre alimentação, sarcopenia e desnutrição em pessoas idosas. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO, utilizando os descritores “sarcopenia”, “malnutrition”, “older adults”, “protein requirements”, “GLIM criteria” e “sarcopenic obesity”, isolados e combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR.

Foram incluídos exclusivamente estudos publicados entre 2021 e 2025, priorizando revisões sistemáticas, metanálises, consensos de sociedades científicas e estudos de coorte publicados em periódicos revisados por pares, em português e inglês. Excluíram-se materiais sem revisão por pares, resumos de congresso e publicações anteriores a 2021. O conteúdo selecionado foi organizado tematicamente, contemplando as alterações do envelhecimento sobre a composição corporal, os critérios diagnósticos e a

prevalência da sarcopenia e da desnutrição, a obesidade sarcopênica, a adequação de proteínas e micronutrientes, os padrões alimentares protetores e as estratégias combinadas de intervenção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENVELHECIMENTO, COMPOSIÇÃO CORPORAL E RISCO NUTRICIONAL

O envelhecimento é acompanhado por alterações progressivas na composição corporal, caracterizadas pelo declínio concomitante da massa e da função muscular e pelo aumento e redistribuição do tecido adiposo, com maior deposição visceral, intra-hepática e intramuscular (Prado *et al.*, 2024). Essas mudanças ocorrem mesmo na ausência de variação significativa do peso corporal, o que dificulta o reconhecimento precoce do risco nutricional apenas por parâmetros antropométricos tradicionais.

Paralelamente, fatores como redução do apetite relacionada à idade, alterações sensoriais, disfagia, polifarmácia, multimorbidade, isolamento social e limitações de mobilidade e renda aumentam a vulnerabilidade do idoso à ingestão alimentar inadequada, favorecendo tanto a instalação da sarcopenia quanto o desenvolvimento de desnutrição proteico-energética (Yeung *et al.*, 2021).

3.2 SARCOPENIA NO IDOSO

3.2.1 Definição, Diagnóstico e Critérios Atuais

A sarcopenia é definida como uma doença musculoesquelética progressiva e generalizada, caracterizada pela redução da força, da quantidade ou qualidade e do desempenho físico muscular. Os critérios diagnósticos mais amplamente utilizados na literatura recente propostos por grupos de trabalho europeu e asiático baseiam-se em uma sequência de rastreamento, avaliação da força muscular (por exemplo, força de prensão manual), quantificação da massa muscular e, quando indicado, avaliação do desempenho físico (Ruiz-Valenzuela *et al.*, 2025).

Revisões que aplicaram tanto a versão original quanto a versão revisada desses critérios evidenciam diferenças relevantes na prevalência estimada de sarcopenia conforme o algoritmo diagnóstico adotado, reforçando a necessidade de padronização metodológica para permitir comparações entre estudos e populações (Ruiz-Valenzuela *et al.*, 2025).

3.2.2 Prevalência Global

Estimativas de prevalência da sarcopenia em adultos acima de 60 anos variam amplamente, situando-se, de modo geral, entre aproximadamente 10% e 27% da população idosa, com variação relevante conforme os critérios diagnósticos aplicados, o cenário assistencial avaliado (comunidade, hospital ou instituição de longa permanência) e as características étnicas e regionais das amostras estudadas (Petermann-Rocha *et al.*, 2022). A prevalência tende a ser consideravelmente maior em idosos

hospitalizados, institucionalizados ou com múltiplas comorbidades em comparação a idosos saudáveis residentes na comunidade.

3.3 DESNUTRIÇÃO NO IDOSO

3.3.1 Critérios GLIM e Triagem Nutricional

O diagnóstico de desnutrição em adultos, incluindo a população idosa, tem sido cada vez mais orientado pelos critérios do Global Leadership Initiative on Malnutrition (GLIM), que combinam critérios fenotípicos perda de peso não intencional, índice de massa corporal reduzido e redução da massa muscular e critérios etiológicos redução da ingestão ou assimilação alimentar e inflamação aguda ou crônica relacionada à doença, conforme sintetizado no Quadro 1. O diagnóstico de desnutrição requer a presença de pelo menos um critério fenotípico e um etiológico (Cederholm; Barazzoni, 2023).

Quadro 1 – Critérios GLIM para diagnóstico de desnutrição

Critérios Fenotípicos	Critérios Etiológicos
Perda de peso não intencional	Redução da ingestão ou assimilação alimentar
Índice de massa corporal reduzido	Inflamação aguda ou crônica relacionada à doença
Redução da massa muscular	

Fonte: elaborado pela autora com base em Cederholm e Barazzoni (2023).

A validade e a aplicabilidade dos critérios GLIM em populações idosas têm sido objeto de revisões recentes, que apontam boa capacidade discriminativa desses critérios, ainda que sejam necessários ajustes de pontos de corte e maior padronização dos instrumentos de triagem prévia utilizados antes da aplicação do algoritmo diagnóstico (Cederholm; Barazzoni, 2023). A Mini Avaliação Nutricional (MNA), instrumento validado especificamente para idosos, permanece como referência para triagem e avaliação nutricional nesse grupo etário, mais de duas décadas após sua criação (Guigoz; Vellas, 2021).

3.3.2 Prevalência e Impacto Clínico da Desnutrição

Estudos prospectivos conduzidos em idosos residentes na comunidade demonstram que a desnutrição diagnosticada pelos critérios GLIM está associada a maior risco de desfechos adversos, incluindo hospitalização, declínio funcional e mortalidade, mesmo após ajuste para idade, sexo e comorbidades (Yeung *et al.*, 2021). Esses achados reforçam a importância da triagem nutricional sistemática em consultas de atenção primária e em serviços geriátricos, permitindo identificação precoce e intervenção nutricional oportuna.

3.4 OBESIDADE SARCOPÊNICA: UM FENÓTIPO EMERGENTE

A obesidade sarcopênica é definida pela coexistência de excesso de adiposidade e redução da massa e/ou função muscular, condição cuja padronização diagnóstica foi estabelecida por consenso conjunto de sociedades europeias de nutrição clínica e de estudo da obesidade, que propõe etapas sequenciais de rastreamento, diagnóstico e estadiamento, com uso de diferentes técnicas de composição corporal e testes funcionais (Donini *et al.*, 2022).

Esse fenótipo é particularmente desafiador do ponto de vista clínico, pois a presença de obesidade pode mascarar a perda de massa muscular subjacente, retardando o diagnóstico da sarcopenia e comprometendo desfechos relacionados à mobilidade, à independência funcional e ao risco cardiometabólico. O manejo da obesidade sarcopênica envolve intervenções combinadas de estilo de vida, exercício físico, terapia nutricional e, em alguns casos, abordagens farmacológicas emergentes (Prado *et al.*, 2024).

A insegurança alimentar — caracterizada pelo acesso limitado ou incerto a alimentos adequados e nutritivos — tem sido identificada como determinante relevante tanto da obesidade quanto da sarcopenia em idosos, na medida em que compromete a qualidade da dieta e favorece o consumo de alimentos de menor densidade nutricional e maior densidade energética (Fonseca-Pérez *et al.*, 2022).

3.5 ADEQUAÇÃO PROTEICA E AMINOACÍDICA NA PREVENÇÃO DA SARCOPENIA

3.5.1 Necessidades e Recomendações de Proteína

Embora a recomendação dietética de referência para proteínas em adultos permaneça em 0,8 g/kg de peso corporal por dia independentemente da idade, revisões críticas recentes da literatura científica apontam que essa recomendação pode ser insuficiente para a manutenção da massa e da função muscular em pessoas idosas, sugerindo que o debate sobre valores mais elevados permanece em aberto e depende de diferentes abordagens metodológicas utilizadas nos estudos de balanço nitrogenado e de síntese proteica (Nishimura *et al.*, 2023).

Grupos de especialistas recomendam, para idosos saudáveis, uma ingestão proteica média de pelo menos 1,0 a 1,2 g/kg/dia para manutenção e recuperação da massa magra e da função muscular, com valores ainda maiores — entre 1,2 e 1,5 g/kg/dia — recomendados em situações de doença aguda ou crônica, conforme sintetizado na Tabela 1 (Groenendijk *et al.*, 2024).

Tabela 1 – Recomendações de ingestão proteica para idosos

População	Recomendação proteica	Observações
Idoso saudável	1,0 a 1,2 g/kg/dia	Manutenção da massa e função muscular
Idoso com doença aguda ou crônica	1,2 a 1,5 g/kg/dia	Necessidade aumentada por catabolismo
Idoso com sarcopenia estabelecida	$\geq 1,2$ g/kg/dia, distribuída nas refeições	Associada a exercício resistido quando possível

Fonte: elaborado pela autora com base em Groenendijk *et al.* (2024) e Nishimura *et al.* (2023).

Além da quantidade total de proteína, a distribuição da ingestão ao longo do dia e a qualidade da fonte proteica particularmente seu conteúdo em aminoácidos essenciais são discutidas como fatores relevantes para otimizar a síntese proteica muscular em idosos, embora a magnitude desses efeitos ainda seja debatida na literatura (Nishimura *et al.*, 2023).

3.5.2 Leucina, Aminoácidos de Cadeia Ramificada e Whey Protein

Suplementos ricos em aminoácidos de cadeia ramificada, particularmente leucina, têm sido investigados quanto à sua capacidade de estimular a via de sinalização anabólica muscular em idosos. Uma metanálise de ensaios clínicos avaliando desfechos segundo os critérios EWGSOP2 mostrou resultados favoráveis, porém heterogêneos, para parâmetros de força e massa muscular, sugerindo benefício potencial, especialmente quando associados a exercício físico (Bai *et al.*, 2022).

De modo semelhante, uma revisão sistemática e metanálise sobre suplementação combinada de proteína do soro do leite (whey protein), leucina e vitamina D em pacientes com sarcopenia identificou melhorias em alguns desfechos relacionados à força e à função física, embora a heterogeneidade metodológica entre os estudos limite conclusões definitivas sobre o protocolo ideal de suplementação (Chang; Choo, 2023).

3.6 VITAMINA D E SAÚDE MUSCULAR

A vitamina D desempenha papel relevante na função neuromuscular, e sua deficiência é prevalente na população idosa, sobretudo em razão da menor exposição solar, da redução da capacidade de síntese cutânea e de alterações na absorção intestinal. Uma metanálise em rede comparando diferentes estratégias de suplementação de vitamina D em idosos com sarcopenia buscou identificar a dose e a forma de administração mais eficazes para melhorar parâmetros musculares, encontrando variação relevante de efeito conforme o esquema terapêutico adotado (Cheng *et al.*, 2021).

Por outro lado, uma revisão sistemática e metanálise focada especificamente na suplementação isolada de vitamina D (monoterapia), sem associação com exercício ou outros nutrientes, indicou efeitos

discretos e inconsistentes sobre os índices de sarcopenia em idosos residentes na comunidade, sugerindo que a vitamina D isolada pode não ser suficiente para reverter o quadro sarcopênico, sendo mais eficaz como parte de estratégias combinadas (Prokopidis *et al.*, 2022).

3.7 PADRÕES ALIMENTARES SAUDÁVEIS E PREVENÇÃO DA SARCOPENIA

Além de nutrientes isolados, padrões alimentares completos têm sido associados ao risco de sarcopenia em adultos de meia-idade e idosos. Uma revisão sistemática e metanálise que considerou tanto os critérios diagnósticos originais quanto os revisados do grupo europeu de trabalho em sarcopenia identificou associação inversa entre a adesão a padrões alimentares saudáveis — caracterizados por maior consumo de vegetais, frutas, cereais integrais, leguminosas, peixes e azeite de oliva, e menor consumo de carnes processadas e alimentos ultraprocessados — e o risco de sarcopenia, embora a magnitude da associação tenha variado conforme os critérios diagnósticos utilizados nos estudos originais (Ruiz-Valenzuela *et al.*, 2025).

3.8 INSEGURANÇA ALIMENTAR E VULNERABILIDADE NUTRICIONAL DO IDOSO

A insegurança alimentar constitui determinante social relevante e frequentemente subestimado da desnutrição e da sarcopenia em idosos, particularmente em contextos de baixa renda. O acesso limitado a alimentos nutritivos compromete a qualidade da dieta, favorecendo simultaneamente a perda de massa muscular e o ganho de tecido adiposo, o que contribui para a instalação da obesidade sarcopênica nessa população (Fonseca-Pérez *et al.*, 2022). O reconhecimento da insegurança alimentar como fator de risco reforça a necessidade de políticas públicas de segurança alimentar e nutricional voltadas especificamente ao idoso, para além das intervenções clínicas individuais.

3.9 ESTRATÉGIAS COMBINADAS: EXERCÍCIO, SUPLEMENTAÇÃO E CUIDADO MULTIPROFISSIONAL

A evidência mais consistente para o manejo da sarcopenia envolve a combinação de exercício físico, sobretudo o treinamento resistido, com adequação nutricional. Uma metanálise em rede comparando diferentes modalidades de exercício em idosos com sarcopenia demonstrou benefícios superiores do treinamento de força e de programas multicomponentes sobre desfechos de força muscular, massa muscular e desempenho físico, quando comparados a intervenções isoladas ou à ausência de exercício (Shen *et al.*, 2023).

A associação entre exercício físico e suplementação nutricional proteica, de aminoácidos de cadeia ramificada ou de vitamina D tende a produzir efeitos superiores aos observados com cada intervenção isolada, reforçando a recomendação de abordagens multimodais no cuidado ao idoso com sarcopenia ou em

risco nutricional (Bai *et al.*, 2022; CHANG; CHOO, 2023). Nesse contexto, o cuidado nutricional ao idoso deve ser conduzido de forma multiprofissional, envolvendo nutricionistas, médicos geriatras, fisioterapeutas e educadores físicos, com triagem sistemática do risco nutricional, avaliação individualizada da composição corporal e da funcionalidade, e planejamento alimentar que considere as preferências, a capacidade mastigatória e digestiva, e as condições socioeconômicas de cada indivíduo.

4 CONCLUSÃO

A sarcopenia e a desnutrição representam síndromes nutricionais interligadas e altamente prevalentes na população idosa, com impacto direto sobre a funcionalidade, a independência e a sobrevida. As evidências publicadas desde 2021 consolidam a compreensão de que critérios diagnósticos padronizados como os algoritmos revisados de sarcopenia, os critérios GLIM para desnutrição e o consenso sobre obesidade sarcopênica são fundamentais para identificação precoce e comparabilidade entre estudos e serviços de saúde.

Do ponto de vista nutricional, a adequação da ingestão proteica, a atenção a micronutrientes como a vitamina D, a adoção de padrões alimentares saudáveis e o enfrentamento da insegurança alimentar mostram-se estratégias centrais e complementares, cujos efeitos são potencializados quando associados à prática regular de exercício físico, sobretudo o treinamento resistido.

Persistem, contudo, lacunas relacionadas à heterogeneidade metodológica dos estudos, à necessidade de padronização de protocolos de suplementação e à escassez de ensaios clínicos de longo prazo em populações idosas vulneráveis. O avanço do conhecimento nessa área depende da atuação integrada entre profissionais de nutrição, geriatria, fisioterapia e educação física, bem como do fortalecimento de políticas públicas voltadas à segurança alimentar e nutricional do idoso, de modo a traduzir as evidências científicas em estratégias efetivas de promoção da saúde e da qualidade de vida na terceira idade.

REFERÊNCIAS

- BAI, G. H.; TSAI, M. C.; TSAI, H. W.; CHANG, C. C.; HOU, W. H. Effects of branched-chain amino acid-rich supplementation on EWGSOP2 criteria for sarcopenia in older adults: a systematic review and meta-analysis. **European Journal of Nutrition**, v. 61, n. 2, p. 637–651, 2022.
- CEDERHOLM, T.; BARAZZONI, R. Validity and feasibility of the global leadership initiative on malnutrition diagnostic concept in older people: a literature review from August 2021 to August 2022. **Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care**, v. 26, n. 1, p. 23–31, 2023.
- CHANG, M. C.; CHOO, Y. J. Effects of whey protein, leucine, and vitamin D supplementation in patients with sarcopenia: a systematic review and meta-analysis. **Nutrients**, v. 15, p. 521, 2023.

CHENG, S. H.; CHEN, K. H.; CHEN, C.; CHU, W. C.; KANG, Y. N. The optimal strategy of vitamin D for sarcopenia: a network meta-analysis of randomized controlled trials. **Nutrients**, v. 13, p. 3589, 2021.

DONINI, L. M. *et al.* Definition and diagnostic criteria for sarcopenic obesity: ESPEN and EASO consensus statement. **Clinical Nutrition**, v. 41, n. 4, p. 990–1000, 2022.

FONSECA-PÉREZ, D.; ARTEAGA-PAZMIÑO, C.; MAZA-MOSCOSO, C. P.; FLORES-MADRID, S.; ÁLVAREZ-CÓRDOVA, L. Food insecurity as a risk factor of sarcopenic obesity in older adults. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 1040089, 2022.

GROENENDIJK, I.; DE GROOT, L. C. P. G. M.; TETENS, I.; GROOTSWAGERS, P. Discussion on protein recommendations for supporting muscle and bone health in older adults: a mini review. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, 1394916, 2024.

GUIGOZ, Y.; VELLAS, B. Nutritional assessment in older adults: MNA® 25 years of a screening tool & a reference standard for care and research; what next? **Journal of Nutrition, Health & Aging**, v. 25, p. 528–583, 2021.

NISHIMURA, Y.; HØJFELDT, G.; BREEN, L.; TETENS, I.; HOLM, L. Dietary protein requirements and recommendations for healthy older adults: a critical narrative review of the scientific evidence. **Nutrition Research Reviews**, v. 36, n. 1, p. 69–85, 2023.

PETERMANN-ROCHA, F. *et al.* Global prevalence of sarcopenia and severe sarcopenia: a systematic review and meta-analysis. **Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle**, v. 13, n. 1, p. 86–99, 2022.

PRADO, C. M.; BATISIS, J. A.; DONINI, L. M.; GONZALEZ, M. C.; SIERVO, M. Sarcopenic obesity in older adults: a clinical overview. **Nature Reviews Endocrinology**, v. 20, p. 261–277, 2024.

PROKOPIDIS, K. *et al.* Effect of vitamin D monotherapy on indices of sarcopenia in community-dwelling older adults: a systematic review and meta-analysis. **Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle**, v. 13, p. 1642–1652, 2022.

RUIZ-VALENZUELA, R. E.; ARTACHO, R.; RUIZ-LÓPEZ, M. D.; MOLINA-MONTES, E. Healthy dietary patterns and risk of sarcopenia in adults aged > 50 years: a systematic review and meta-analysis considering EWGSOP1 and EWGSOP2 criteria. **Nutrients**, v. 17, p. 2764, 2025.

SHEN, Y. *et al.* Exercise for sarcopenia in older people: a systematic review and network meta-analysis. **Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle**, v. 14, p. 1199–1211, 2023.

YEUNG, S. S. Y.; CHAN, R. S. M.; KWOK, T.; LEE, J. S. W.; WOO, J. Malnutrition according to GLIM criteria and adverse outcomes in community-dwelling Chinese older adults: a prospective analysis. **Journal of the American Medical Directors Association**, v. 22, p. 1953–1959.e4, 2021.

REALIZAÇÃO:

Aurum
EDITORA

CNPJ: 589029480001-12
contato@aurumeditora.com
(41) 98792-9544
Curitiba - Paraná
www.aurumeditora.com