

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Microencapsulamento de extrato de casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) com proteínas do soro do leite, ervilha e soja: Avaliação da estabilidade, morfologia e bioacessibilidade

Therys Senna de Castro Oliveira
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

THERYS SENNA DE CASTRO OLIVEIRA

Microencapsulamento de extrato de casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) com proteínas do soro do leite, ervilha e soja: Avaliação da estabilidade, morfologia e bioacessibilidade

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Paulo Cesar Stringheta

Coorientador: Evandro Martins

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48m
2025

Oliveira, Therys Senna de Castro, 1998-

Microencapsulamento de extrato de casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) com proteínas do soro, ervilha e soja: avaliação da estabilidade, morfologia e bioacessibilidade / Therys Senna de Castro Oliveira. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (134 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Paulo César Stringheta.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Tecnologia de Alimentos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.470>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Jabuticaba. 2. Compostos bioativos das plantas.
3. Antocianinas. I. Stringheta, Paulo César, 1952-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Tecnologia de Alimentos. Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos.
III. Título.

CDD 22. ed. 664.8

THERYS SENNA DE CASTRO OLIVEIRA

Microencapsulamento de extrato de casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) com proteínas do soro do leite, ervilha e soja: Avaliação da estabilidade, morfologia e bioacessibilidade

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de julho de 2025.

Assentimento:

Therys Senna de Castro Oliveira
Autora

Paulo Cesar Stringheta
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 16/10/2025 às 17:32:53 e pelo orientador em 16/10/2025 às 17:38:11. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **HW67.ZBHP.2OKF** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos melhores agricultores que conheço, que me ensinaram que, para colher, é
preciso muito mais do que simplesmente plantar.

É necessário preparar o solo com carinho, adubar com esperança, regar com
esforço e, acima de tudo, cultivar com paciência diante das intempéries da vida.

A vocês, meus pais, Luciene e Rubenil, que semearam em mim os valores que
florescem nesta conquista, dedico, com todo o meu amor, este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda a força ao longo da caminhada, pois em momento algum declinei do meu objetivo, mantendo-me firme na fé de que sempre daria certo.

Agradeço a mim pela resiliência e pela firmeza nas convicções que tornaram possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Luciene e Rubenil, e à minha irmã Sandy, que sempre me mostraram o verdadeiro significado de família e caminharam ao meu lado na busca por todos os meus sonhos e objetivos profissionais.

Ao meu amado Miguel, que foi uma doce surpresa na véspera da seletiva do mestrado, permanecendo com amor e carinho, sendo força, felicidade e alento.

In memoriam, à minha avó Idalina, a mulher mais revolucionária que habitou este plano e me ensinou a ser mais do que suficiente: a brilhar a ponto de encandecer.

À minha avó Maria, sempre assertiva, coerente e forte — nem por isso menos amada.

À minha imensa família, especialmente às minhas primas que pavimentam o caminho dos estudos e àquelas que me inspiram a pavimentar esse caminho para elas.

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo César Stringheta, que foi uma inspiração acadêmica antes mesmo de conhecê-lo. Sempre exalou confiança no meu trabalho, esteve disposto a compartilhar as melhores histórias e foi um alento em momentos difíceis.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Evandro Martins, sempre muito solícito e dedicado, que me ensinou a importância de realizar sempre a melhor entrega possível.

À banca examinadora, à Doutora Janaina Gonçalves Fernandes, pela disponibilidade em participar e pelas contribuições valiosas. Sua alegria contagiante, mesmo em meio às adversidades, assim como seus conselhos gentis.

Ao Professor Doutor Pedro Henrique Campelo, exemplo de proatividade, eficiência e superação de barreiras, que se mostrou um amigo inspirador.

Aos meus amigos, que tenho como irmãos, Fabiano e Laura, cuja amizade sempre me ergueu e incentivou a ser mais ambiciosa.

Ao meu amigo Arthur, que sempre teve o espírito da representatividade.

Aos colegas do LaCBio, com quem dividir esta jornada foi indescritível — em especial Jhonathan, Gustavo, Luiz Eliel, Philippe, Blenda e João Paulo. Levo vocês em meu coração.

Ao time de pós-doutorandas pelas orientações, em especial à Daiana, cujo

carisma e inteligência são únicos.

A todos que torceram por mim e àqueles que, direta ou indiretamente, tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Aos laboratórios parceiros que contribuíram com análises essenciais para a realização desta pesquisa: Labem, LANAQUA e NMM.

Ao PPGCTA-UFV e ao DTA, pela estrutura oferecida, e aos professores e colegas da pós-graduação pelos momentos compartilhados.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Finalizo agradecendo a oportunidade de ser cientista, ciente dos desafios que a área enfrenta no mundo. Tenho a certeza de que a ciência é a engrenagem de sonhos, de objetivos e de impactos que se estendem muito além da minha própria vida, beneficiando toda a sociedade.

"Mesmo sabendo
que não há tempo de sobra
eles escolhem viver
a versão mais bonita da vida
- girassóis"
(Rupi Kaur)

RESUMO

OLIVEIRA, Therys Senna de Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Microencapsulamento de extrato de casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) com proteínas do soro do leite, ervilha e soja: Avaliação da estabilidade, morfologia e bioacessibilidade.** Orientador: Paulo Cesar Stringheta. Coorientador: Evandro Martins.

A jabuticaba (*Plinia cauliflora*) é uma fruta brasileira rica em antocianinas, compostos bioativos altamente antioxidantes, porém sensíveis às condições do trato gastrointestinal. Este estudo teve como objetivo avaliar a estabilidade e a bioacessibilidade de antocianinas de extrato da casca de jabuticaba microencapsuladas por spray dryer, utilizando diferentes matrizes proteicas: 100% proteína do soro do leite (WPI), 75% WPI + 25% proteína de soja e 75% WPI + 25% proteína de ervilha. As micropartículas foram caracterizadas quanto a colorimetria, teor de antocianinas, compostos fenólicos totais, capacidade antioxidante (ABTS e FRAP), tamanho de partícula, potencial Zeta, eficiência de encapsulamento, morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e interações químicas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). As amostras foram ainda submetidas à digestão gastrointestinal simulada, sendo os sobrenadantes analisados quanto à colorimetria (sistema CIELAB) e teor de antocianinas para o cálculo da bioacessibilidade. As partículas apresentaram tamanho médio abaixo de 1150 d.nm, com potenciais zeta indicativos de estabilidade coloidal. A eficiência de encapsulamento variou entre 59,53% a 64,75% com aumento da eficiência na combinação WPI e proteína de ervilha. As imagens de MEV revelaram superfícies esféricas e contínuas, enquanto o FTIR indicou interações entre proteínas e compostos fenólicos. Durante a digestão, observou-se redução da intensidade de cor e do teor de antocianinas, especialmente na fase intestinal. A formulação com proteína de ervilha apresentou maior teor residual de antocianinas ($1,11 \pm 0,01$ mg/g) e bioacessibilidade de 8,00%, significativamente superior ao extrato livre ($p < 0,05$). Os resultados evidenciam o papel das proteínas vegetais na proteção e liberação dirigida de antocianinas, com potencial aplicação em formulações funcionais.

Palavras-chave: spray drying; proteínas vegetais; sistema cielab; potencial zeta; tamanho de partícula; ftir; microscopia eletrônica de varredura (mev)

ABSTRACT

OLIVEIRA, Therys Senna de Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Microencapsulation of jabuticaba (*Plinia cauliflora*) peel extract with proteins: evaluation of stability, morphology, and bioaccessibility after in vitro digestion.** Adviser: Paulo Cesar Stringheta. Co-adviser: Evandro Martins.

The jabuticaba (*Plinia cauliflora*) is a Brazilian fruit rich in anthocyanins, highly antioxidant bioactive compounds that are, however, sensitive to gastrointestinal conditions. This study aimed to evaluate the stability and bioaccessibility of anthocyanins from jabuticaba peel extract microencapsulated by spray drying, using different protein matrices: 100% whey protein isolate (WPI), 75% WPI + 25% soy protein, and 75% WPI + 25% pea protein. The microparticles were characterized in terms of colorimetry, anthocyanin content, total phenolic compounds, antioxidant capacity (ABTS and FRAP), particle size, zeta potential, encapsulation efficiency, morphology by scanning electron microscopy (SEM), and chemical interactions by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The samples were also subjected to simulated gastrointestinal digestion, and the supernatants were analyzed for color (CIELAB system) and anthocyanin content to calculate bioaccessibility. The particles presented an average size below 1150 d.nm, with zeta potential values indicative of colloidal stability. The encapsulation efficiency ranged from 59.53% to 64.75%, with increased efficiency observed in the combination of WPI and pea protein. SEM images revealed spherical and continuous surfaces, while FTIR indicated interactions between proteins and phenolic compounds. During digestion, a reduction in color intensity and anthocyanin content was observed, particularly in the intestinal phase. The formulation with pea protein showed the highest residual anthocyanin content (1.11 ± 0.01 mg/g) and bioaccessibility of 8.00%, significantly higher than the free extract ($p < 0.05$). These results highlight the role of plant proteins in the protection and targeted release of anthocyanins, indicating their potential application in functional formulations.

Keywords: spray drying; plant proteins; cielab color system; zeta potencial; particle size; ftir; scanning electron microscopy (sem)

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	11
Introdução.....	12
Referências	13
CAPÍTULO 2 – ARTIGO DE REVISÃO.....	16
Resumo	17
1 Introdução.....	18
2 Compostos bioativos e suas características estruturais.....	19
2.1 Compostos bioativos hidrofílicos.....	22
2.1.1 Polifenóis.....	23
2.1.2 Vitaminas Hidrossolúveis.....	24
2.1.3 Peptídeos.....	25
2.1.4 Polissacarídeos	27
2.1.5 Saponinas.....	28
2.2 Compostos bioativos hidrofóbicos.....	29
2.2.1 Carotenoides	30
2.2.2 Ácidos graxos.....	31
2.2.3 Vitaminas lipossolúveis	32
2.3 Probióticos.....	34
3 Proteínas como material encapsulante.....	35
3.1 Proteínas lácteas.....	39
3.2 Proteínas do ovo.....	42
3.3 Proteínas da carne	43
3.4 Proteínas vegetais.....	44
4 Técnicas de encapsulamento	47
5 Conclusão	51
6 Referências	52
CAPÍTULO 3 - ARTIGO EXPERIMENTAL.....	88
Resumo	89
Introdução.....	90
Materiais e métodos.....	92
1.1 Materiais	92
1.2 Metodologia.....	93
1.2.1 Preparação do Extrato Hidrossolúvel de Casca de Jabuticaba	93
1.2.2 Análises do Extrato.....	94
1.2.2.1 Colorimetria.....	94

1.2.2.2	Determinação de Antocianinas Totais - Método pH Único.....	95
1.2.2.3	Determinação de Fenólicos Totais	95
1.2.2.4	Avaliação da Capacidade Antioxidante ABTS (2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolina-6-sulfonado), FRAP (Poder Antioxidante Redutor Férrico)	95
1.2.3	Preparação das Soluções de Material de Parede.....	96
1.2.4	Microencapsulação por Spray Drying	97
1.2.5	Caracterização das Micropartículas.....	97
1.2.5.1	Colorimetria.....	97
1.2.5.2	Teor de Antocianinas Totais	97
1.2.5.3	Teor de Fenólicos Totais.....	98
1.2.5.4	Absorção de antocianinas como eficiência do processo de microencapsulamento.....	98
1.2.5.5	Capacidade Antioxidante.....	99
1.2.5.6	Morfologia das Cápsulas: Técnica utilizada (Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV)	100
1.2.5.7	FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier	100
1.2.5.8	Potencial Zeta e Tamanho de Partícula.....	101
1.2.5.9	Estabilidade das Micropartículas.....	101
1.2.5.10	Digestão <i>In Vitro</i> das Micropartículas	102
1.2.5.11	Colorimetria e quantificação de antocianinas na fase gástrica e intestinal.....	102
1.2.5.12	Bioacessibilidade	103
1.2.5.13	Análise Estatística	103
	Resultados e Discussão.....	103
	Conclusão	126
	Referências	127

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

**Introdução a proteínas e encapsulamento de compostos bioativos da casca
de jabuticaba**

Introdução

O crescente interesse por alimentos funcionais e ingredientes bioativos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à preservação da estabilidade, biodisponibilidade e funcionalidade de compostos naturais. Compostos bioativos, como polifenóis, antocianinas, vitaminas e peptídeos, são amplamente reconhecidos por seus efeitos benéficos à saúde, incluindo atividade antioxidante e anti-inflamatória (Sadowska-Bartosz e Bartosz, 2024). No entanto, sua aplicação direta em alimentos é limitada devido à instabilidade frente a fatores ambientais como pH, temperatura, oxigênio e luz, além da baixa bioacessibilidade durante a digestão (Syamila et al., 2019; Blancas-Benitez et al., 2015).

A microencapsulação é uma tecnologia eficiente para proteger esses compostos, permitindo a liberação controlada e a manutenção de suas propriedades funcionais (Cui et al., 2023). Entre as diversas técnicas disponíveis, o spray drying destaca-se por sua viabilidade econômica, escalabilidade industrial e versatilidade de formulação (Pudžiuvėlytė et al., 2025). A eficiência do processo depende da escolha adequada do material de parede, responsável por formar a matriz protetora do bioativo. Nesse contexto, proteínas têm ganhado destaque devido à sua capacidade de formar filmes, propriedades emulsificantes e compatibilidade com sistemas alimentícios (Oliveira et al., 2025).

O uso de proteínas animais e vegetais como materiais encapsulantes permite modular propriedades tecnológicas e funcionais das micropartículas. A proteína do soro é amplamente empregada pela sua alta solubilidade e capacidade de formar matrizes densas e estáveis (Figueiredo et al., 2025). Já as proteínas vegetais, como as de soja e ervilha, representam alternativas sustentáveis e hipoalergênicas, favorecendo o desenvolvimento de produtos com apelo “plant-based” e menor impacto ambiental (Munialo, 2024). Estudos recentes demonstram que combinações entre proteínas animais e vegetais podem gerar sistemas encapsulantes sinérgicos, com desempenho melhorado quanto à proteção e liberação de compostos fenólicos (Sridhar et al., 2024; Zhang et al., 2025).

A casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*) é fonte de compostos fenólicos, especialmente antocianinas, responsáveis pela sua coloração intensa e elevada capacidade antioxidante (Pitz, et al., 2016). Contudo, a rápida degradação desses pigmentos sob exposição à luz e ao calor compromete seu uso em matrizes alimentares (Modesto Junior et al., 2023). Assim, o microencapsulamento do extrato de casca de jabuticaba em matrizes proteicas representa uma alternativa promissora para proteger as antocianinas, melhorar sua estabilidade durante o armazenamento e aumentar sua bioacessibilidade após a digestão (De Muros Amaral

Barcellos, et al., 2025).

Neste contexto, a presente dissertação foi estruturada em dois artigos complementares. O primeiro artigo apresenta uma revisão abrangente sobre compostos bioativos e o papel das proteínas como materiais encapsulantes, abordando os mecanismos de proteção e as principais técnicas de microencapsulação utilizadas na indústria de alimentos. Enquanto o segundo artigo descreve o microencapsulamento do extrato de casca de jaboticaba utilizando diferentes combinações de proteínas (soro do leite, soja e ervilha), avaliando as propriedades físico-químicas, a estabilidade de armazenamento e a bioacessibilidade *in vitro* dos compostos bioativos. Assim, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre o uso de proteínas funcionais na encapsulação de compostos fenólicos, com potencial aplicação em suplementos e alimentos funcionais.

Referências

- Blancas-Benitez, Francisco J., et al. “Bioaccessibility of Polyphenols Associated with Dietary Fiber and *in Vitro* Kinetics Release of Polyphenols in Mexican ‘Ataulfo’ Mango (*Mangifera Indica* L.) by-Products”. *Food & Function*, vol. 6, no 3, 2015, p. 859–68. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1039/C4FO00982G>.
- Cui, Fangchao, et al. “Advances in the Preparation and Application of Microencapsulation to Protect Food Functional Ingredients”. *Food & Function*, vol. 14, no 15, 2023, p. 6766–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1039/D3FO01077E>.
- De Muros Amaral Barcellos, Tatiana, et al. “Microencapsulated Jaboticaba Berry (*M. Cauliflora*) Juice Improves Storage Stability and *In Vitro* Bioaccessibility of Polyphenols”. *Applied Biosciences*, vol. 4, no 3, junho de 2025, p. 31. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/applbiosci4030031>.
- Figueiredo, Manuel, et al. “Challenges and Advances in the Encapsulation of Bioactive Ingredients Using Whey Proteins”. *Foods*, vol. 14, no 4, fevereiro de 2025, p. 691. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/foods14040691>.

- Modesto Junior, Elivaldo Nunes, et al. “Stability Kinetics of Anthocyanins of Grumixama Berries (*Eugenia Brasiliensis* Lam.) during Thermal and Light Treatments”. *Foods*, vol. 12, no 3, janeiro de 2023, p. 565. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/foods12030565>.
- Munialo, Claire D. “A Review of Alternative Plant Protein Sources, Their Extraction, Functional Characterisation, Application, Nutritional Value and Pinch Points to Being the Solution to Sustainable Food Production”. *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 59, no 1, janeiro de 2024, p. 462–72. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1111/ijfs.16467>.
- Oliveira, Therys Senna De Castro, et al. “Bioactive Compounds and the Performance of Proteins as Wall Materials for Their Encapsulation”. *Micro*, vol. 5, no 3, julho de 2025, p. 36. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/micro5030036>.
- Pitz, Heloisa S., et al. “Assessment of In Vitro Biological Activities of Anthocyanins-Rich Plant Species Based on *Plinia cauliflora* Study Model”. *Protocols for In Vitro Cultures and Secondary Metabolite Analysis of Aromatic and Medicinal Plants, Second Edition*, organizado por S.Mohan Jain, vol. 1391, Springer New York, 2016, p. 65–80. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3332-7_5.
- Pudžiuvėlytė, Lauryna, et al. “Spray-Drying Microencapsulation of Natural Bioactives: Advances in Sustainable Wall Materials”. *Pharmaceuticals*, vol. 18, no 7, junho de 2025, p. 963. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/ph18070963>.
- Sadowska-Bartos, Izabela, e Grzegorz Bartosz. “Antioxidant Activity of Anthocyanins and Anthocyanidins: A Critical Review”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no 22, novembro de 2024, p. 12001. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/ijms252212001>.

Sridhar, Kandi, et al. "Plant and Animal Protein Mixed Systems as Wall Material for Microencapsulation of Mānuka Essential Oil: Characterization and in Vitro Release Kinetics". *Food Research International*, vol. 187, julho de 2024, p. 114419. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114419>.

Syamila, M., et al. "Effect of Temperature, Oxygen and Light on the Degradation of β -Carotene, Lutein and α -Tocopherol in Spray-Dried Spinach Juice Powder during Storage". *Food Chemistry*, vol. 284, junho de 2019, p. 188–97. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.055>.

Zhang, Qiong, et al. "Effect of Interaction between Pea Protein Isolate and Whey Protein Isolate on Encapsulation of Resveratrol". *International Journal of Food Science and Technology*, outubro de 2025, p. vvaf190. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1093/ijfood/vvaf190>.

CAPÍTULO 2 – ARTIGO DE REVISÃO

Compostos bioativos e o desempenho de proteínas como materiais de parede para sua encapsulação

Publicado em: 31 de julho de 2025

Doi: <https://doi.org/10.3390/micro5030036>

Resumo

A encapsulação de compostos bioativos utilizando proteínas como materiais de parede tem emergido como uma estratégia eficaz para aumentar sua estabilidade, biodisponibilidade e liberação controlada. As proteínas oferecem propriedades funcionais únicas, incluindo comportamento anfifílico, capacidade de formação de géis e interações com compostos bioativos, tornando-as candidatas ideais para a encapsulação. Proteínas de origem animal, como o soro do leite e a caseína, apresentam desempenho superior na estabilização de compostos lipofílicos, enquanto proteínas vegetais, como as de soja e ervilha, demonstram maior afinidade por compostos hidrofílicos. Avanços na modificação de proteínas e na formação de complexos proteína-polissacarídeo têm contribuído para o aumento da eficiência de encapsulação, especialmente para compostos sensíveis ao calor e ao pH. Esta revisão explora as características físico-químicas das proteínas utilizadas na encapsulação, as interações entre proteínas e compostos bioativos, bem como as principais técnicas de encapsulamento, incluindo a secagem por atomização (spray drying), coacervação complexa, nanoemulsões e eletrofiação (electrospinning). Além disso, são discutidas as potenciais aplicações de compostos bioativos encapsulados em alimentos funcionais, produtos farmacêuticos e nutracêuticos, destacando o papel das tecnologias emergentes na otimização dos sistemas de liberação. Compreender a sinergia entre proteínas, compostos bioativos e métodos de encapsulação é essencial para o desenvolvimento de produtos funcionais mais estáveis, biodisponíveis e sustentáveis.

Palavras-chave: Bioacessibilidade; Estabilidade térmica; Compostos hidrofílicos; Compostos lipofílicos; Probióticos

1 Introdução

O termo “alimentos funcionais” foi proposto pela primeira vez no Japão, na década de 1980, e refere-se a alimentos que, além de fornecerem nutrientes essenciais, também oferecem benefícios específicos à saúde quando consumidos regularmente (Kaur & Das, 2011). Esses benefícios estão diretamente relacionados à presença de compostos bioativos — substâncias capazes de interagir com componentes de tecidos vivos, promovendo efeitos metabólicos e fisiológicos que contribuem para o bem-estar e a prevenção de doenças (Perpetuini et al., 2020). No contexto alimentar, os compostos bioativos podem variar desde pequenas moléculas, como flavonoides, até microrganismos utilizados como probióticos (Tabela 1).

Para que um alimento seja considerado funcional, não basta conter compostos bioativos; eles devem estar presentes em concentrações adequadas para garantir efeitos benéficos à saúde. A ingestão diária recomendada (IDR) de um composto bioativo depende de vários fatores, como biodisponibilidade, bioacessibilidade, metabolismo individual, finalidade da suplementação, estado nutricional do indivíduo e evidências científicas disponíveis (Rautiainen et al., 2016). O mercado oferece uma ampla variedade desses produtos, incluindo iogurtes probióticos (Activia® – Danone com *Bifidobacterium animalis lactis* DN-173 010/CNCM I-2494, Yakult® – Yakult Honsha com *Lactobacillus casei* Shirota, Vigor Viv® – Vigor com *Lactobacillus acidophilus* e *Bifidobacterium lactis*) que auxiliam na saúde intestinal; bebidas enriquecidas com antioxidantes, como sucos integrais de uva (Vita Suco®, Native®, Welch’s®) e chás verdes (Leão Fuze® – Coca-Cola®, Feel Good®, Lipton®); alimentos ricos em ômega-3, como margarinas fortificadas (Becel® – Flora Flood Group, Qualy Vida® – Seara, Delícia Supreme® – Bunge, Benecol® – Raisio Group), que promovem a saúde cardiovascular; e barras de cereais com fibras prebióticas (Levittá®), que ajudam a manter o equilíbrio da microbiota intestinal.

Apesar do crescente interesse por alimentos funcionais, a aplicação de compostos bioativos em alimentos ainda é limitada devido à fragilidade dessas substâncias frente às condições de processamento, transporte e armazenamento. Muitas vezes, são necessárias doses elevadas para se alcançar os efeitos desejados (Akolade et al., 2017). Além disso, os compostos bioativos podem apresentar sabor amargo e adstringente, e sua biodisponibilidade oral pode ser baixa, limitando seu uso prático em alimentos (Aditya et al., 2017). As propriedades físico-químicas desses compostos também podem dificultar sua aplicação em determinados produtos, como no caso de compostos lipofílicos que precisam

ser incorporados a matrizes aquosas (Fallahasghari et al., 2025).

Uma solução promissora para superar essas limitações é a encapsulação em matrizes proteicas, que oferece proteção contra condições adversas, minimiza perdas sensoriais e nutricionais e mascara sabores indesejáveis (Martins et al., 2017). Esse processo consiste na inclusão de compostos bioativos em materiais carreados, o que pode aumentar sua biodisponibilidade e, conseqüentemente, potencializar seus benefícios à saúde (Justus et al., 2020). Rezagholizade-Shirvan et al. (2024) demonstraram que compostos bioativos encapsulados apresentam melhor absorção e retenção no organismo em comparação às suas formas livres, o que é especialmente vantajoso para compostos com baixa estabilidade química ou solubilidade.

As proteínas, por sua vez, apresentam características ideais para essa aplicação, como capacidade tamponante, presença de aminoácidos hidrofílicos e hidrofóbicos e habilidade de formar matrizes gelificadas ou filmes que promovem liberação controlada (Mohammadian et al., 2020). Além disso, sua solubilidade em água e a possibilidade de serem obtidas de fontes renováveis tornam as proteínas uma alternativa sustentável e eficaz para melhorar a estabilidade e biodisponibilidade de compostos bioativos (Sorrenti et al., 2023). Sua capacidade de formar cápsulas resistentes à digestão gástrica, aliada ao aumento da biodisponibilidade dos compostos, torna essa abordagem ainda mais promissora para superar as limitações da aplicação desses compostos em alimentos funcionais (Dahiya et al., 2023).

Esta revisão tem como objetivo explorar as características físicas e químicas dos compostos bioativos e de algumas proteínas alimentares, investigando suas interações no processo de encapsulação e abordando as principais técnicas utilizadas para sua aplicação em alimentos funcionais. Por meio desta abordagem, busca-se compreender como a encapsulação pode superar as limitações associadas aos compostos bioativos, contribuindo para o desenvolvimento de alimentos funcionais.

2 Compostos bioativos e suas características estruturais

Os compostos bioativos pertencem a diversas classes químicas, como compostos fenólicos (flavonoides, ácidos fenólicos), carotenoides, compostos organossulfurados, alcaloides, peptídeos bioativos e microrganismos, cujas estruturas determinam sua funcionalidade, solubilidade e destino metabólico (Xavier et al., 2024).

A Tabela 1, apresentada a seguir, traz exemplos de fontes de compostos bioativos

de diferentes classes, com foco em seus efeitos biológicos. Essa tabela ilustra claramente os benefícios associados ao consumo desses compostos.

Tabela 1 – Compostos bioativos, benefícios à saúde e fontes.

Classe Química	Compostos Bioativos	Efeitos Metabólicos e Fisiológicos	Benefícios à Saúde	Produto Comercial	Autores
Flavonoides	Antocianinas	Antidiabético; Antiobesidade; Antiproliferativo; Antimicrobiano; Antiinflamatório	Redução do risco de doenças crônicas como diabetes	Suco de uva, açaí, vinho	Bhushan et al. (2024)
Carotenoides	Carotenoides	Anticarcinogênico; Imunomodulador; Antiinflamatório; Antibacteriano; Antidiabético; Neuroprotetor	Proteção do sistema nervoso	Colorau, produtos cárneos	Islam et al. (2024)
Alcaloides	Cafeína	Ação neuromuscular	Melhora do desempenho em atividades físicas	Suplementos alimentares, café, energéticos	Santos et al. (2023)
Polifenóis	Curcuminoides	Antioxidante; Antibacteriano	Tratamento da síndrome do intestino irritável e úlceras	Cúrcuma	Cooney et al. (2016); Tyagi et al. (2015); Patel et al. (2020)
Polifenóis	Hidroxitirosol	Antioxidante; Antiinflamatório; Redução da oxidação de LDL; Atividade anticarcinogênica	Redução do risco de doenças cardiovasculares, inflamatórias e degenerativas	Azeitonas, azeite de oliva	Covas et al. (2006)
Esteróis	Fitosteróis	Regulação do metabolismo de colesterol e lipídios; Anticarcinogênico	Controle do colesterol	Frutas, vegetais, óleos vegetais, nozes e sementes	Le Goff et al. (2019); Vuorio e Kovanen (2018)
Polissacarídeos	Inulina	Antiinflamatório	Melhora da saúde intestinal	Raízes e tubérculos como chicória e alcachofra de Jerusalém	Niness (1999)
Ácidos graxos	Ômega-3 e Ômega-6	Antiinflamatório e antifúngico; Reduz o risco de morte cardiovascular e infarto do miocárdio	Redução do risco de morte cardiovascular e infarto; Redução de triglicerídeos	Óleo de peixe, linhaça, soja e canola	Shen et al. (2022); Abdi-Moghadam et al. (2023)

Ácidos graxos	Ômega-3 e Ômega- 6	Suporte à função cerebral; Redução de triglicerídeos	Suporte à função cerebral	Óleo de peixe, linhaça, soja e canola	Shen et al. (2022); Abdi-Moghadam et al. (2023)
Vitaminas	Vitamina D	Promove a absorção de cálcio e sustenta o sistema imunológico	Redução do risco de osteoporose e doenças autoimunes	Alimentos fortificados	Sirbe et al. (2022)
	Vitamina C	Antioxidante potente; Estimula a produção de leucócitos	Redução do risco de doenças crônicas, especialmente câncer	Frutas cítricas	Jafari et al. (2019)
	Vitamina E	Protege as células contra danos oxidativos	Redução do risco de doenças cardíacas e câncer	Nozes e sementes	Didier et al. (2023)
Bactérias Gram-positivas	Probióticos (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*)	Antiinflamatório; Antimicrobiano; Antioxidante; Antihipertensivo; Imunomodulador; Melhora da função intestinal	Regulação intestinal, digestão, saúde da pele, função imune, impacto potencial na saúde mental via eixo intestino-cérebro	Iogurte, kefir, chucrute, kimchi, kombucha, suplementos alimentares	Chugh e Kamal-Eldin (2020)

O estudo da estrutura química dos compostos bioativos é fundamental para sua aplicação eficaz na produção de alimentos. As características moleculares desses compostos determinam sua funcionalidade, biodisponibilidade e estabilidade, influenciando suas interações com os componentes dos alimentos e com as matrizes de encapsulamento. A natureza química da molécula bioativa também desempenha um papel crucial na definição do método de encapsulação e do material carreador apropriados. Compostos bioativos hidrofílicos, como polifenóis e peptídeos, frequentemente requerem carreadores hidrofílicos, como proteínas do soro do leite, enquanto compostos lipofílicos, como carotenoides e ácidos graxos ômega-3, se beneficiam de sistemas de encapsulamento à base de lipídios, incluindo proteínas vegetais como as zeínas e gliadinas (Wan et al., 2015).

Por exemplo, a curcumina, um polifenol hidrofóbico com propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, apresenta baixa solubilidade em água e rápida degradação sob luz e calor (Mondal et al., 2016). A encapsulação em sistemas proteicos melhora sua estabilidade e biodisponibilidade, permitindo sua incorporação em alimentos funcionais (Ye et al., 2021). Da mesma forma, probióticos requerem técnicas de

encapsulamento, como a microencapsulação com proteínas do leite, para protegê-los da acidez gástrica e garantir sua viabilidade no trato intestinal (Shori, 2017).

Uma compreensão aprofundada da estrutura química e da estabilidade dos compostos bioativos permite que cientistas de alimentos desenvolvam alimentos funcionais inovadores com benefícios à saúde aprimorados. Ao utilizar tecnologias avançadas de encapsulamento e selecionar estratégias de formulação adequadas, é possível melhorar a bioeficácia dos bioativos, assegurando sua estabilidade durante o processamento e o armazenamento.

Nas seções a seguir, discutiremos as características estruturais e químicas dos principais compostos bioativos hidrofílicos e hidrofóbicos utilizados na produção de alimentos.

2.1 Compostos bioativos hidrofílicos

Compostos bioativos solúveis em água tendem a possuir grupos funcionais polares, como hidroxila (-OH), carbonila (C=O), carboxila (-COOH), amino (-NH₂) e sulfato (-SO₃H), que podem interagir favoravelmente com moléculas de água polares (Zabot et al., 2022). Esses grupos polares criam interações dipolo-dipolo e ligações de hidrogênio com a água, aumentando a solubilidade (Rezaei et al., 2019). De modo geral, esses compostos também contêm grupos funcionais hidrofílicos (atraentes à água), como hidroxila, amina ou carboxila, que facilitam o processo de dissolução (McClements, 2015). Esses grupos permitem que o composto forme ligações de hidrogênio com a água, aumentando sua solubilidade.

Muitos compostos bioativos, especialmente os que são ácidos (por exemplo, ácidos fenólicos) ou básicos (por exemplo, alcaloides), podem se ionizar na água, formando espécies carregadas altamente solúveis em soluções aquosas. A presença de grupos iônicos como carboxilatos (-COO⁻) ou grupos amônio (-NH₃⁺) aumenta a solubilidade do composto em água (Manach et al., 2005). Além disso, compostos com estruturas moleculares mais flexíveis podem interagir mais facilmente com moléculas de água. Por exemplo, alguns peptídeos ou aminoácidos, devido à sua capacidade de adotar diversas conformações, podem aumentar a solubilidade em ambientes aquosos (Uversky et al., 2000).

Outro fator relacionado à solubilidade em água é a presença de substituintes carregados ou polares (Delaney, 2004). Compostos conjugados com substituintes

carregados ou polares, como grupos sulfato, fosfato ou glicosídeos, apresentam melhor solubilidade. Por exemplo, glicosídeos (como os glicosídeos de flavonoides) têm solubilidade em água aprimorada em comparação aos seus correspondentes agliconas, devido às frações de açúcares hidrofílicos ligadas a eles (Manach et al., 2005).

Os principais compostos bioativos solúveis em água presentes em alimentos funcionais incluem polifenóis, peptídeos, aminoácidos, vitaminas e alguns carboidratos, sendo que cada um desempenha um papel significativo na promoção da saúde e na prevenção de doenças (Hayes e Tiwari, 2015).

2.1.1 Polifenóis

Os polifenóis constituem um amplo grupo de compostos bioativos amplamente encontrados em alimentos de origem vegetal, como frutas, vegetais, chás e grãos integrais.

São compostos grandes e diversos, caracterizados pela presença de múltiplos anéis fenólicos

— estruturas aromáticas que contêm grupos hidroxila (-OH) ligados a um anel benzênico. São altamente solúveis em água devido aos seus grupos hidroxila, que permitem a formação de ligações de hidrogênio com moléculas de água (Ciupei et al., 2024).

A estrutura química dos polifenóis é geralmente definida pelo número e arranjo dos grupos hidroxila ligados aos anéis aromáticos, bem como pela presença de grupos funcionais adicionais, como metoxi (-OCH₃), carbonila (C=O) ou hidroximetil (-CH₂OH) (Lee et al., 2005). Os flavonoides são um subgrupo dos polifenóis com um esqueleto comum formado por dois anéis aromáticos conectados por uma ponte de três carbonos (Santos-Buelga e Feliciano, 2017). Os flavonoides são subdivididos em vários subgrupos, incluindo antocianinas, flavonóis, flavonas e isoflavonas, cada um distinguido pelas variações nos padrões de hidroxilação e substituição nos anéis aromáticos (Shen et al., 2022). Os polifenóis não flavonoides incluem ácidos fenólicos (por exemplo, ácido cafeico, ácido ferúlico), estilbenos (por exemplo, resveratrol) e lignanas, que também apresentam múltiplos grupos hidroxila e diferentes graus de aromaticidade (Ciupei et al., 2024).

Os polifenóis são particularmente sensíveis à oxidação devido à presença de grupos hidroxila, que tendem a doar elétrons para espécies reativas de oxigênio (ROS), levando à oxidação e à formação de quinonas, semiquinonas ou produtos polimerizados (Geng et al., 2023). A estabilidade dos polifenóis também pode ser afetada pelo pH: ambientes ácidos os tornam mais estáveis, pois os grupos hidroxila estão menos propensos à ionização e

oxidação (Xiao, 2022). Já em condições alcalinas, os polifenóis podem sofrer processos de degradação, como hidrólise ou rearranjos estruturais, resultando na perda de bioatividade (Honda et al., 2019). Por exemplo, as antocianinas são altamente sensíveis ao pH, com sua coloração variando de vermelho em meio ácido para azul ou roxo em ambientes alcalinos (Sigurdson et al., 2017).

Altas temperaturas podem romper ligações nos anéis aromáticos ou transformar a estrutura polifenólica em formas menos estáveis ou inativas, o que é particularmente relevante durante o processamento ou armazenamento de alimentos (Zhang et al., 2022). A exposição à luz, por sua vez, pode gerar espécies reativas de oxigênio, promovendo a oxidação dos polifenóis. Esse fenômeno é frequentemente observado na degradação de antocianinas em frutas e vegetais, onde a exposição à luz solar causa desbotamento e perda da atividade antioxidante (Enaru et al., 2021).

Fatores relacionados ao processamento ou armazenamento de alimentos podem alterar a estrutura química dos polifenóis, reduzindo sua biodisponibilidade no produto final.

Tratamentos térmicos, exposição ao oxigênio, variações de pH e interações com outros componentes alimentares podem causar degradação, oxidação ou polimerização dos polifenóis, limitando sua absorção e atividade biológica.

2.1.2 Vitaminas Hidrossolúveis

As vitaminas hidrossolúveis são micronutrientes essenciais que desempenham papéis cruciais em diversas funções metabólicas e fisiológicas do corpo humano. Diferentemente das vitaminas lipossolúveis, elas não são armazenadas em quantidades significativas e devem ser obtidas regularmente por meio da dieta (Mousavi Khaneghah et al., 2019). Sua bioatividade depende da estrutura química, que pode ser influenciada por condições de processamento e armazenamento.

As vitaminas hidrossolúveis incluem o complexo B (B1, B2, B3, B5, B6, B7, B9 e B12) e a vitamina C. São caracterizadas por sua natureza polar, que permite sua dissolução em ambientes aquosos. Essas vitaminas geralmente contêm grupos funcionais como hidroxila (-OH), carboxila (-COOH), amina (-NH₂) e fosfato (-PO₄), que facilitam sua participação em reações enzimáticas e no metabolismo celular (Malik et al., 2023).

Em termos estruturais, a vitamina B1 (Tiamina) consiste em um anel tiazólico e um anel pirimidínico ligados por uma ponte de metileno, enquanto a vitamina B2 (Riboflavina)

apresenta um sistema de anel flavina ligado a uma cadeia lateral de ribitol. A vitamina B3 (Niacina) existe em duas formas — ácido nicotínico e nicotinamida — ambas derivadas da piridina, enquanto a vitamina B5 (Ácido pantotênico) é formada por um grupo ácido pantóico ligado à β -alanina (Hrubša et al., 2022).

De maneira semelhante, a vitamina B6 (Piridoxina, Piridoxal, Piridoxamina) é composta por derivados da piridina com diferentes grupos funcionais, e a vitamina B7 (Biotina) é um composto ureídico bicíclico com uma cadeia lateral de ácido valérico. A vitamina B9 (Folato) contém um anel pteridina, ácido p-aminobenzoico e um grupo glutamato, enquanto a vitamina B12 (Cobalamina) se distingue por um anel corrina com um átomo central de cobalto (Hrubša et al., 2022). Por fim, a vitamina C (Ácido ascórbico) é uma estrutura de anel lactona com grupos enediol, que conferem propriedades antioxidantes (Njus et al., 2020).

As vitaminas hidrossolúveis atuam como coenzimas ou precursoras de coenzimas, desempenhando papel vital em reações enzimáticas em diversas vias bioquímicas. As vitaminas do complexo B são essenciais para o metabolismo de carboidratos, lipídios e proteínas, enquanto algumas vitaminas específicas exercem funções adicionais críticas (Gonçalves e Portari, 2021; Njus et al., 2020). A tiamina (B1), piridoxina (B6) e cobalamina (B12) apoiam a síntese de neurotransmissores e a função neural, enquanto o folato (B9) e a cobalamina (B12) são fundamentais para a biossíntese de nucleotídeos e eritropoiese (Calderón-Ospina e Nava-Mesa, 2020). Já a vitamina C atua como um potente antioxidante, eliminando radicais livres, promovendo a síntese de colágeno e fortalecendo as defesas imunológicas (Alberts et al., 2025).

A estrutura química das vitaminas hidrossolúveis é altamente suscetível à degradação sob determinadas condições, o que pode comprometer significativamente sua biodisponibilidade. Altas temperaturas podem degradar vitaminas termolábeis como a tiamina (B1) e o folato (B9), enquanto a vitamina C é particularmente vulnerável a condições alcalinas, sofrendo degradação oxidativa (Godoy et al., 2021). A riboflavina (B2) é fotossensível e se deteriora quando exposta à luz ultravioleta ou visível (Sheraz et al., 2014). Além disso, o ácido ascórbico e diversas vitaminas do complexo B são suscetíveis à oxidação, o que reduz sua eficácia (Ribeiro et al., 2011).

2.1.3 Peptídeos

Peptídeos bioativos, geralmente compostos por 2 a 20 resíduos de aminoácidos,

exibem diversas propriedades funcionais que dependem de sua sequência e composição (Besharati e Maximilian Lackner, 2023). Eles se originam de várias fontes proteicas, cada uma contribuindo com benefícios distintos à saúde. Caseínas e proteínas do soro do leite atuam como precursoras de peptídeos com propriedades anti-hipertensivas, antimicrobianas e imunomoduladoras (Mohanty et al., 2016). Peptídeos derivados de colágeno estão associados à melhora da saúde da pele e das articulações, enquanto proteínas de peixe geram peptídeos com efeitos tanto antioxidantes quanto anti-hipertensivos (Campos et al., 2023; Kurnianto et al., 2024). De forma semelhante, proteínas vegetais provenientes de soja, arroz, trigo e leguminosas produzem peptídeos com atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e redutoras de colesterol (Fan et al., 2022). Além disso, cereais e proteínas do ovo são fontes valiosas de peptídeos com potenciais funções antimicrobianas e anti-hipertensivas (Liao et al., 2018).

A bioatividade dos peptídeos é determinada por sua sequência de aminoácidos, a qual influencia sua interação com alvos biológicos. Por exemplo, alguns peptídeos inibem a enzima conversora da angiotensina (ECA), auxiliando na regulação da pressão arterial, enquanto outros (peptídeos derivados de atum, feijão-preto e cominho) atuam como sequestradores de radicais livres, reduzindo o estresse oxidativo e protegendo as células (Tanzadehpanah et al., 2016). Peptídeos como nisina e melitina apresentam atividade antimicrobiana ao romperem membranas celulares bacterianas, enquanto outros (como IDR-1018 e IDR-1002) modulam respostas imunológicas, potencialmente fortalecendo os mecanismos de defesa e reduzindo a inflamação (Pushpanathan et al., 2013). Adicionalmente, peptídeos derivados de caseína, proteína de soja e leite também atuam no metabolismo lipídico, reduzindo a absorção e a síntese de colesterol (Ma et al., 2023).

A eficácia funcional dos peptídeos bioativos depende de sua estabilidade durante o processamento, armazenamento e digestão. Diversos fatores influenciam sua biodisponibilidade, como resistência à degradação enzimática no trato digestivo, estabilidade em diferentes condições de pH e temperatura, e interações com outros componentes alimentares, que podem favorecer ou prejudicar a absorção (Pei et al., 2022).

Peptídeos bioativos vêm sendo cada vez mais incorporados a produtos alimentares funcionais para maximizar seus benefícios à saúde. Exemplos incluem alimentos lácteos enriquecidos com peptídeos, como iogurtes, queijos e produtos fermentados; suplementos proteicos e bebidas fortificadas; produtos de panificação e snacks, como pães, biscoitos e barras de proteína; além de nutracêuticos e suplementos alimentares desenvolvidos para finalidades específicas (Fernando e Wu, 2025).

Como uma classe promissora de ingredientes para alimentos funcionais, os peptídeos bioativos oferecem uma ampla gama de benefícios à saúde. Compreender suas relações estrutura-função, estabilidade e biodisponibilidade é essencial para otimizar sua aplicação em produtos alimentares. Avanços contínuos em pesquisa e tecnologia ampliarão ainda mais seu potencial na promoção da saúde humana e na prevenção de doenças crônicas.

2.1.4 Polissacarídeos

Polissacarídeos bioativos variam em estrutura, o que influencia diretamente sua funcionalidade. Sua composição química inclui fatores como composição de monossacarídeos, podendo ser homopolissacarídeos (formados por um único tipo de monossacarídeo) ou heteropolissacarídeos (com diferentes unidades monossacarídicas) (Wang et al., 2024). O tipo de ligação glicosídica, seja α ou β , é outro fator crítico, pois determina solubilidade, digestibilidade e bioatividade (Yuan et al., 2025). O grau de ramificação também exerce influência; polissacarídeos como amilopectina e arabinoxilanas possuem estruturas ramificadas que afetam sua capacidade de formar géis e interagir com outros componentes da matriz alimentar (Niño-Medina et al., 2010). Além disso, o peso molecular do polissacarídeo afeta sua viscosidade e capacidade de formação de géis — polissacarídeos de alto peso molecular, como β -glucanas, apresentam maior viscosidade, o que pode impactar sua biodisponibilidade e efeitos funcionais no organismo (Cheng et al., 2024).

Os efeitos fisiológicos dos polissacarídeos bioativos decorrem de suas interações com sistemas biológicos, resultando em várias bioatividades. Efeitos prebióticos são observados em compostos como inulina e frutooligosacarídeos (FOS), que servem de substrato para microrganismos benéficos do intestino, estimulando a produção de ácidos graxos de cadeia curta (AGCCs) que favorecem a saúde intestinal (Anand et al., 2025). Propriedades imunomoduladoras são atribuídas às β -glucanas e fucóides, que ativam macrófagos, células dendríticas e células NK (natural killers) (Zhong et al., 2023). Quanto à regulação do metabolismo de lipídios e colesterol, fibras solúveis como pectinas e β -glucanas formam géis viscosos que reduzem a absorção de colesterol e a reabsorção de ácidos biliares (Surampudi et al., 2016). Alguns polissacarídeos, como fucóides e arabinogalactanas, apresentam efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios, atuando na remoção de radicais livres e na redução do estresse oxidativo (Phull et al., 2017). Além

disso, podem modular a absorção de glicose, melhorando a sensibilidade à insulina e reduzindo a resposta glicêmica pós-prandial (Kellogg et al., 2025).

Polissacarídeos bioativos interagem com proteínas, lipídios e minerais, influenciando sua funcionalidade e biodisponibilidade. Alguns polissacarídeos se ligam a proteínas, melhorando propriedades emulsificantes, mas podendo reduzir a digestibilidade proteica (Fontes-Candia et al., 2025). Compostos como alginatos e pectinas podem quelar minerais como cálcio, ferro e zinco, impactando sua biodisponibilidade; já a quitosana interage com lipídios, sequestrando gorduras alimentares e auxiliando no controle do peso (Panith et al., 2016; Liu et al., 2024).

Polissacarídeos de baixo peso molecular tendem a ter maior solubilidade e absorção, enquanto outros requerem fermentação microbiana no intestino para se tornarem bioativos, tornando a composição da microbiota intestinal um fator essencial (Xi et al., 2024). Condições de armazenamento, como temperatura, umidade e exposição à luz, também afetam a estabilidade dos polissacarídeos ao longo da vida útil.

2.1.5 Saponinas

As saponinas são um grupo diversificado de compostos naturalmente presentes em várias espécies vegetais, especialmente em leguminosas, cereais e plantas medicinais (Sharma et al., 2023). Esses compostos são conhecidos por suas propriedades semelhantes às do sabão, como a capacidade de formar espumas estáveis em soluções aquosas, devido à natureza anfipática de sua estrutura molecular (Timilsena et al., 2023). As saponinas vêm despertando interesse em alimentos funcionais por suas propriedades bioativas, incluindo efeitos redutores de colesterol, atividade antioxidante, imunomodulação e potencial anticancerígeno (Singh et al., 2017).

As saponinas são glicosídeos compostos por dois componentes principais: uma aglicona hidrofóbica (também chamada de sapogenina) e uma ou mais unidades de açúcar hidrofílicas (Sharma et al., 2023). A parte aglicona pode ter estrutura esteroidal ou triterpenoide, enquanto os açúcares geralmente incluem glicose, galactose ou ramnose (Bake et al., 2022). As saponinas são classificadas em esteroidais e triterpenoides. As esteroidais são típicas de espécies como *Solanum* (ex.: tomate, batata) e aspargos (Huang e Kong, 2006), enquanto as triterpenoides são encontradas em ginseng, quinoa e soja (Sharma et al., 2023).

A bioatividade das saponinas resulta de sua capacidade de interagir com membranas

biológicas e modular processos fisiológicos. Elas se ligam ao colesterol e aos ácidos biliares no trato gastrointestinal, impedindo sua absorção e promovendo a excreção (Sidhu e Oakenfull, 1986). Isso reduz os níveis de colesterol sérico, auxiliando no controle da hipercolesterolemia. Muitas saponinas também possuem propriedades antioxidantes, neutralizando radicais livres e diminuindo o estresse oxidativo, o que pode contribuir para a prevenção de doenças crônicas como doenças cardiovasculares e câncer (Khan et al., 2022). Além disso, elas modulam o sistema imunológico ao ativar macrófagos e estimular a produção de citocinas, o que pode reforçar as defesas e reduzir inflamações (Shen et al., 2023). Por fim, saponinas do ginseng e da quinoa demonstraram inibir a proliferação de células cancerígenas e induzir apoptose (Cho et al., 2009; Shang et al., 2025), além de potencializar o efeito de quimioterápicos convencionais.

Em matrizes alimentares, saponinas podem quelar minerais essenciais como cálcio, ferro e magnésio, afetando sua biodisponibilidade (Southon et al., 1988). Isso é particularmente relevante em dietas à base de plantas. Elas também interagem com lipídios no trato gastrointestinal, dificultando sua absorção e modificando o metabolismo lipídico (Cao et al., 2024), o que ajuda a reduzir o colesterol.

Altas temperaturas durante o processamento (ex.: fervura ou fritura) podem degradar saponinas, reduzindo suas propriedades funcionais (Tarade et al., 2006). No entanto, algumas tornam-se mais biodisponíveis após o aquecimento devido à quebra de estruturas complexas. Saponinas também são sensíveis ao pH: condições extremas (abaixo de 3 ou acima de 9) podem hidrolisar a ligação glicosídica, alterando sua bioatividade e toxicidade potencial (Wu et al., 2024). Além disso, armazenamento prolongado, especialmente sob altas temperaturas, umidade ou luz, pode acelerar sua degradação (Wu et al., 2024).

2.2 Compostos bioativos hidrofóbicos

Os compostos bioativos hidrofóbicos presentes nos alimentos formam um grupo diverso de moléculas caracterizadas por sua baixa solubilidade em água e alta afinidade por ambientes lipofílicos. Suas estruturas químicas frequentemente contêm cadeias de hidrocarbonetos apolares, anéis aromáticos ou outros grupos hidrofóbicos que contribuem para sua solubilidade em lipídios (Ashour et al., 2019). O grau de saturação, ramificação e os grupos funcionais ligados a essas estruturas influenciam suas propriedades físico-químicas e bioatividade (Cruz e Pereira, 2022).

Muitos compostos bioativos hidrofóbicos apresentam longas cadeias de hidrocarbonetos ou anéis aromáticos fundidos, o que contribui para sua baixa solubilidade em água. Entre os principais bioativos hidrofóbicos encontrados em alimentos funcionais podem ser citados os carotenoides (por exemplo, β -caroteno, licopeno, luteína, astaxantina), os ácidos graxos (como ômega-3 (DHA, EPA), ômega-6, ácido linoleico conjugado (CLA)), tocoferóis (vitamina E) e alcaloides com propriedades hidrofóbicas, como a cafeína presente nos grãos de café (Vanin et al., 2023).

2.2.1 Carotenoides

Os carotenoides são uma classe de pigmentos tetraterpenoides naturais com fórmula molecular geral $C_{40}H_{56}$. Sua estrutura é composta por oito unidades de isopreno (C_5H_8) unidas em arranjo cabeça-cauda, formando uma cadeia hidrocarbonada linear ou cíclica com um sistema altamente conjugado de ligações simples e duplas alternadas (Krinsky e Johnson, 2005). Esse extenso sistema de elétrons π conjugados é responsável pela forte absorção de luz no espectro visível, conferindo as cores amarelas, alaranjadas e vermelhas características (Britton, 2022).

Os carotenoides são classificados em carotenos, como o licopeno e o β -caroteno, que contêm apenas carbono (C) e hidrogênio (H), e xantofilas, que incorporam átomos de oxigênio (O) na forma de grupos hidroxila (-OH), epóxidos ou cetonas (McClements et al., 2007). O sistema de duplas ligações conjugadas permite a eliminação de espécies reativas de oxigênio (ROS) e a absorção de luz, conferindo elevada atividade antioxidante (Fernandes et al., 2018). A variação estrutural entre extremidades cíclicas e acíclicas influencia tanto a estabilidade quanto a biodisponibilidade, sendo que os carotenoides cíclicos, como o β -caroteno, desempenham papel importante na atividade pró-vitamina A (Saini et al., 2022). Além disso, os carotenoides contribuem para a pigmentação e fotoproteção das plantas, oferecendo benefícios essenciais à saúde, especialmente na visão (como precursores dos retinoides), função imunológica e redução do estresse oxidativo (Terao, 2023).

O alto grau de insaturação dos carotenoides os torna suscetíveis à degradação oxidativa, particularmente na presença de oxigênio (O_2) e espécies reativas de oxigênio (ROS). A oxidação leva à quebra da cadeia polieno, gerando produtos de oxidação incolores ou de baixo peso molecular, como apocarotenoides e epoxicarotenoides, que carecem da atividade biológica dos compostos originais (Walter e Strack, 2011). Produtos

da oxidação lipídica, como hidroperóxidos, podem acelerar ainda mais a degradação dos carotenoides, reduzindo seu potencial antioxidante (Terao, 2023).

Os carotenoides ocorrem naturalmente na configuração *all-trans*, mais estável termodinamicamente e com maior bioatividade (Telegina et al., 2023). No entanto, a exposição ao calor durante o processamento de alimentos (por exemplo, pasteurização, cozimento, secagem) pode induzir à isomerização *cis*, alterando a configuração espacial e potencialmente reduzindo a capacidade antioxidante (Updike e Schwartz, 2003). Embora alguns isômeros *cis* apresentem maior bioacessibilidade devido à solubilidade aumentada, tratamentos térmicos excessivos podem levar à despolimerização e perda da integridade funcional.

Os carotenoides são altamente sensíveis à luz, especialmente à luz ultravioleta (UV) e visível, que promovem a fotooxidação pela geração de oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$). Essa espécie reativa interage com a cadeia polieno, levando à formação de epóxidos e peróxidos, comprometendo a estabilidade da cor e a bioatividade (Lavelli e Sereikaitė, 2022). A exposição à luz é particularmente prejudicial em alimentos com baixa umidade, óleos e bebidas, onde a degradação dos carotenoides é acelerada.

Carotenoides permanecem relativamente estáveis em condições de pH neutro, mas ambientes extremamente ácidos ou alcalinos podem promover sua hidrólise e degradação oxidativa (Ngamwonglumlert et al., 2017). Enzimas como peroxidases e lipoxigenases, comuns em tecidos vegetais frescos, catalisam a quebra dos carotenoides, contribuindo para a perda de pigmento em frutas e vegetais minimamente processados (Temiz e Ayhan, 2017).

2.2.2 Ácidos graxos

Os ácidos graxos são ácidos monocarboxílicos alifáticos que servem como blocos estruturais dos lipídios. Esses compostos podem ser classificados como saturados, monoinsaturados ou poli-insaturados, dependendo do número de ligações duplas em sua estrutura. Também se diferenciam pelo comprimento da cadeia, que pode variar de 4 a 28 carbonos. Ácidos graxos de cadeia longa (LCFAs) são aqueles com caudas alifáticas de 16 ou mais carbonos (Ruiz-Rodriguez et al., 2010). Entre os ácidos graxos bioativos, destacam-se os ômega-3 e ômega-6, classificados como poli-insaturados, ou seja, contêm duas ou mais ligações duplas em sua estrutura (Akoh, 2017). A estabilidade desses compostos depende de diversos fatores, como grau de insaturação, temperatura, exposição

ao oxigênio, luz, pH, atividade enzimática e interações com outros componentes alimentares. Alterações na estrutura química, como oxidação, hidrólise, isomerização e polimerização, podem impactar as propriedades sensoriais, nutricionais e funcionais dos alimentos lipídicos, afetando sua biodisponibilidade e benefícios à saúde.

Entre os principais fatores que afetam a estabilidade dos ácidos graxos, a oxidação leva à formação de sabores desagradáveis, compostos tóxicos e perda do valor nutricional. Os ácidos graxos saturados são relativamente estáveis, devido à ausência de ligações duplas, enquanto os monoinsaturados, como o ácido oleico, são moderadamente suscetíveis à oxidação, mas ainda mais estáveis que os poli-insaturados (Choe e Min, 2006). Os ácidos graxos poli-insaturados, como o ômega-3 (ácido α -linolênico) e o ômega-6 (ácido linoleico), são altamente propensos a danos oxidativos devido à presença de múltiplas ligações duplas, que funcionam como sítios reativos para o ataque de oxigênio.

A estabilidade química dos ácidos graxos é fortemente influenciada pela temperatura e pelas condições de armazenamento, levando à oxidação, hidrólise, isomerização e polimerização, o que compromete suas propriedades nutricionais e funcionais. Os ácidos graxos poli-insaturados são particularmente vulneráveis devido às múltiplas ligações duplas, tornando-os mais suscetíveis à oxidação lipídica, que gera hidroperóxidos que se decompõem em aldeídos e cetonas, causando rancidez (Zhuang et al., 2022). Altas temperaturas aceleram a oxidação, promovem a isomerização *cis-trans* (levando à formação de ácidos graxos trans) e induzem à polimerização, formando compostos de alto peso molecular que reduzem a digestibilidade e qualidade dos lipídios (Zhuang et al., 2022).

2.2.3 Vitaminas lipossolúveis

As vitaminas hidrofóbicas são uma classe de moléculas orgânicas caracterizadas por sua natureza apolar, o que lhes permite dissolver-se em lipídios e não em água. Essas vitaminas — incluindo as vitaminas A, D, E e K — apresentam propriedades bioativas essenciais para funções fisiológicas como visão, homeostase do cálcio, defesa antioxidante e coagulação sanguínea (Andrès et al., 2024).

Essas vitaminas geralmente possuem longas cadeias de hidrocarbonetos ou sistemas de anéis fundidos com poucos grupos funcionais polares, o que contribui para sua solubilidade

lipídica (Andrès et al., 2024). Embora possam conter algumas porções polares (como grupos hidroxila ou carbonila), suas estruturas são predominantemente compostas por cadeias alquílicas, unidades isoprenoides ou núcleos de esterano, o que facilita sua interação com lipídios (Samanta, 2022).

Muitas vitaminas lipossolúveis, como a vitamina A (retinoides) e a vitamina E (tocoferóis e tocotrienóis), são derivadas da biossíntese de isoprenoides, tornando-as estruturalmente relacionadas aos terpenos (Irfan et al., 2024). A vitamina D se destaca por ser derivada de esteróis, apresentando um núcleo de esterano (ciclopentanoperidrofenantreno) que sofre transformação fotoquímica na pele (Holick et al., 2007).

A estabilidade das vitaminas hidrofóbicas (A, D, E e K) durante o processamento e armazenamento de alimentos é influenciada por diversos fatores físico-químicos e ambientais. A exposição ao calor, em particular, acelera a oxidação, isomerização e hidrólise, levando à perda de nutrientes. As vitaminas A, D e E são altamente sensíveis a altas temperaturas, com aquecimento prolongado causando clivagem oxidativa (Hrncirik, 2010). A vitamina K apresenta estabilidade térmica moderada, mas degrada-se gradualmente com o cozimento prolongado (Kim et al., 2023).

A fotodegradação, induzida pela formação de radicais livres, leva à degradação estrutural das vitaminas lipossolúveis. A vitamina A e os carotenoides são altamente sensíveis à luz, sofrendo isomerização e oxidação (Jia et al., 2021). A vitamina D degrada-se sob exposição à radiação UV, formando compostos biologicamente inativos. A vitamina E sofre fotodecomposição, o que reduz sua capacidade antioxidante, e algumas formas da vitamina K, como a filoquinona, também se degradam quando expostas à luz (Godoy et al., 2021).

A exposição ao oxigênio acelera a degradação oxidativa por meio da peroxidação lipídica, reações com radicais livres e clivagem molecular. A vitamina A e os carotenoides passam por auto-oxidação, levando à perda de atividade e formação de derivados não funcionais (Mordi et al., 2020). Embora a vitamina E atue como antioxidante, ela é gradualmente consumida ao combater a oxidação lipídica. Da mesma forma, a vitamina K é suscetível à degradação oxidativa, especialmente na presença de pró-oxidantes como metais (Bergstrom et al., 2012).

Condições extremas de pH comprometem ainda mais a estabilidade das vitaminas, acelerando a hidrólise e isomerização. Em ambientes altamente ácidos ou alcalinos, a vitamina A sofre clivagem oxidativa, enquanto as vitaminas D e K, embora

moderadamente estáveis, também se degradam sob essas condições (Berry, 2010). A vitamina E, particularmente sensível a ambientes alcalinos, sofre hidrólise de ésteres, reduzindo sua eficácia. Essa degradação compromete a biodisponibilidade e bioacessibilidade dessas vitaminas, prejudicando suas funções fisiológicas.

2.3 Probióticos

Probióticos são microrganismos vivos que conferem benefícios à saúde quando consumidos em quantidades adequadas. Eles pertencem principalmente a gêneros bacterianos como *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Streptococcus* e *Enterococcus*, bem como a leveduras probióticas, como *Saccharomyces*. A seguir, apresenta-se uma visão geral detalhada de suas características morfológicas e propriedades principais.

De modo geral, as bactérias são microrganismos Gram-positivos classificados como bactérias ácido-láticas, com estrutura celular composta por uma membrana plasmática bilipídica com proteínas embutidas, envolvida por uma parede celular robusta. Essa parede consiste em um sacúlo de peptidoglicano espesso e multicamadas, complementado por ácidos teicoicos e/ou lipoteicoicos, exopolissacarídeos, filamentos proteicos (pili) e outras proteínas de superfície, que contribuem para a resistência e funcionalidade do microrganismo (Sengupta et al., 2013).

Entre as leveduras probióticas, destaca-se a *Saccharomyces boulardii*, cuja estrutura foi estudada por Kwak et al. (2020), que destacaram os seguintes aspectos: a parede celular apresenta organização estrutural complexa, composta predominantemente por manoproteínas, β -glucanas e quitina, que desempenham papéis essenciais na integridade e na interação com o ambiente externo. As mananas, presentes nas manoproteínas, formam uma camada externa que protege a célula e facilita a adesão às superfícies. As β -glucanas, polímeros de glicose com ligações β -1,3 e β -1,6, conferem resistência mecânica à parede celular, enquanto a quitina, presente em menor quantidade, contribui para a estabilidade estrutural adicional.

Altas temperaturas durante o processamento de alimentos (por exemplo, pasteurização, secagem por atomização) podem inativar células probióticas ao desnaturar enzimas e proteínas estruturais essenciais, comprometendo funções metabólicas e a integridade celular. O calor também aumenta a permeabilidade da membrana, causa coagulação citoplasmática, danifica o DNA e os ribossomos e induz estresse oxidativo por espécies reativas de oxigênio (ROS) (Martín et al., 2015). A exposição ao oxigênio,

particularmente prejudicial a cepas anaeróbicas como *Bifidobacterium spp.*, pode causar peroxidação lipídica, enquanto condições ácidas (comuns em alimentos fermentados), associadas a compostos antimicrobianos (como ácidos orgânicos e bacteriocinas), podem inibir o crescimento probiótico (Tripathi e Giri, 2014).

A interação entre probióticos e proteínas melhora a sobrevivência das células probióticas sob diversas condições de estresse encontradas durante o processamento e armazenamento de alimentos. As proteínas apresentam forte capacidade tamponante, ajudando a estabilizar o pH ao redor das células probióticas. Isso é particularmente importante em ambientes ácidos (como produtos fermentados), onde as proteínas podem mitigar os efeitos nocivos do pH baixo sobre as membranas celulares e enzimas intracelulares (Senaka Ranadheera et al., 2012). A carga superficial e a hidrofobicidade de proteínas e células probióticas influenciam suas interações. Essas interações podem promover maior adesão e encapsulamento, melhorando a estabilidade estrutural e a tolerância ao estresse.

3 Proteínas como material encapsulante

Para o encapsulamento de compostos bioativos, as proteínas mais amplamente estudadas têm origem no leite, ovos, carne e fontes vegetais. Essas proteínas apresentam tanto vantagens quanto desvantagens na produção de cápsulas alimentícias (Tabela 2).

Tabela 2 – Materiais de parede utilizados para o encapsulamento de compostos bioativos.

Fonte	Vantagens	Desvantagens	Autores
Proteínas lácteas	Boa estabilidade e compatibilidade com uma variedade de ingredientes alimentícios.	Potencial alergenicidade, propriedades de gelificação moderadas que podem ser afetadas pelo pH.	Rahman Mazumder e Ranganathan (2020)

Proteínas do ovo	Alta qualidade nutricional, capacidade de gelificação e retenção de água, e custo-benefício.	Potencial alergenicidade, incompatibilidade com alguns ingredientes, sensibilidade ao processamento e possível contribuição para sabor ou odor indesejável em algumas aplicações.	Zhang et al. (2023)
Proteínas da carne	Capacidade de formar géis e emulsões estáveis.	Potencial alergenicidade para algumas pessoas, bem como preocupações com sustentabilidade e impacto ambiental relacionadas à produção de carne.	Zhang et al. (2023)
Proteínas vegetais	Promissoras para liberação no trato gastrointestinal devido à digestibilidade reduzida e alta hidrofobicidade superficial, permitindo transporte de compostos bioativos hidrofóbicos.	A preparação desses sistemas geralmente requer equipamentos de alta energia ou uso de solventes orgânicos, o que limita sua aplicação na indústria alimentícia.	Wang e Zhang (2019)

As proteínas são macromoléculas compostas por aminoácidos ligados por ligações peptídicas, organizadas em quatro níveis estruturais. A estrutura primária corresponde à sequência linear de aminoácidos, enquanto a estrutura secundária forma α -hélices e folhas β , estabilizadas por ligações de hidrogênio. A estrutura terciária é o enovelamento tridimensional de uma única cadeia polipeptídica, moldado por diversas interações moleculares. A estrutura quaternária consiste em múltiplas subunidades polipeptídicas mantidas por forças similares.

Em termos de interações proteicas, bioativos hidrofílicos, como polifenóis, vitaminas e peptídeos, formam ligações de hidrogênio com aminoácidos que contêm

grupos hidroxila, carboxila ou amida, como serina e glutamina (Shahidi e Dissanayaka, 2023). Também ocorrem interações eletrostáticas com resíduos carregados como lisina, arginina e glutamato (Añazco et al., 2023).

Compostos bioativos lipofílicos, como carotenoides, vitaminas lipossolúveis e ácidos graxos ômega-3, interagem com aminoácidos apolares como leucina, isoleucina e fenilalanina (Zhu et al., 2020). Essas interações são principalmente conduzidas por forças de van der Waals e interações hidrofóbicas, facilitando a estabilidade e funcionalidade dos compostos lipofílicos em matrizes alimentares.

A interação entre proteínas e superfícies celulares microbianas (bactérias e leveduras) é regida por uma combinação de forças químicas não covalentes. Essas interações desempenham papéis essenciais na adesão, encapsulamento, formação de biofilmes, estabilização em sistemas alimentares e entrega de probióticos.

As superfícies celulares de bactérias e leveduras são geralmente carregadas negativamente devido à presença de ácidos teicoicos (em bactérias Gram-positivas), lipopolissacarídeos (em Gram-negativas) ou manoproteínas e glucanas (nas paredes celulares de leveduras). As proteínas, dependendo de seu ponto isoelétrico (pI) e do pH do meio, podem apresentar carga positiva ou negativa. Quando a proteína está carregada positivamente (em pH abaixo de seu pI), pode interagir eletrostaticamente com a superfície microbiana negativamente carregada, promovendo adesão ou revestimento (Wilson et al., 2001). Regiões hidrofóbicas das proteínas podem interagir com regiões hidrofóbicas da membrana microbiana ou de componentes da parede celular (ex.: lipídios, resíduos hidrofóbicos ou proteínas de superfície), sendo essas interações especialmente importantes em ambientes hidrofóbicos (Kahraman et al., 2016).

Grupos funcionais nas proteínas (ex.: $-OH$, $-NH_2$, $-COOH$) podem formar ligações de hidrogênio com grupos complementares na superfície microbiana, como peptidoglicanos, polissacarídeos ou proteínas de superfície (Zhang et al., 2025). Atrações fracas como forças de van der Waals tornam-se significativas quando ocorrem simultaneamente em grandes áreas de superfície (Busscher et al., 2008). Em alguns sistemas especializados (ex.: sistemas de liberação ou biofilmes), ligações covalentes entre proteínas e componentes da superfície microbiana podem ocorrer, muitas vezes facilitadas por ação enzimática (ex.: transglutaminases ou entrecruzadores), resultando em fixação forte e irreversível, útil em estratégias de imobilização ou encapsulamento (Oteng-Pabi et al., 2014).

Como materiais encapsulantes, as proteínas apresentam características ideais para

essa aplicação, como capacidade tampão, presença de aminoácidos hidrofílicos e hidrofóbicos, e a habilidade de formar matrizes ou filmes em gel que garantem liberação controlada (Mohammadian et al., 2020). Além disso, sua solubilidade em água e a possibilidade de serem obtidas de fontes renováveis tornam as proteínas uma opção sustentável e eficaz para melhorar a estabilidade e biodisponibilidade de compostos bioativos (Sorrenti et al., 2023). A capacidade de formar cápsulas resistentes à digestão gástrica, combinada ao aumento da biodisponibilidade dos compostos, torna as proteínas uma solução ainda mais promissora para superar as limitações associadas à aplicação desses compostos em alimentos funcionais (Dahiya et al., 2023).

Diversas técnicas de encapsulamento têm sido amplamente empregadas para a proteção e liberação controlada de compostos bioativos hidrofílicos, lipofílicos e probióticos utilizando proteínas como agentes encapsulantes. Métodos como secagem por atomização (spray drying), liofilização, coacervação, emulsificação, eletrospray e complexação demonstraram eficiência na estabilização de compostos sensíveis e na melhora de sua biodisponibilidade (Muhoza et al., 2023). A escolha da técnica depende das propriedades físico-químicas do composto bioativo, do perfil de liberação desejado e das características funcionais da matriz proteica. Essas técnicas e seus mecanismos fundamentais já foram amplamente documentados em revisões abrangentes anteriores e, portanto, não serão o foco central deste artigo (Abdul-Al et al., 2023).

A interação entre proteínas e compostos bioativos determina a eficiência de encapsulamento, principalmente por meio da natureza e força das interações físico-químicas estabelecidas durante o processo de encapsulação. A flexibilidade estrutural das proteínas, sua capacidade de sofrer mudanças conformacionais e sua natureza anfifílica aprimoram ainda mais o desempenho de encapsulamento, promovendo arranjos espaciais favoráveis ao redor dos bioativos. Essas interações não apenas melhoram o aprisionamento físico dos compostos, mas também contribuem para sua estabilização ao protegê-los de fatores ambientais como oxidação, calor e variações de pH. A Tabela 3 resume as principais fontes proteicas utilizadas como materiais encapsulantes de compostos bioativos, juntamente com a eficiência de encapsulamento relatada para cada aplicação. Nas seções seguintes, são apresentadas as estruturas químicas das principais proteínas empregadas como agentes encapsulantes e discutidos os possíveis mecanismos de interação proteína–bioativo que influenciam a eficiência do encapsulamento.

Tabela 3. Principais fontes de proteínas utilizadas como materiais encapsulantes para

compostos bioativos e a eficiência de encapsulamento.

Composto bioativo	Material encapsulante (proteína)	Técnica de encapsulamento	Eficiência de encapsulamento (%)	Referência
Vitamina A	Proteína do soro do leite	Spray drying	85	Ray et al. (2016)
Ácidos graxos ômega-3	Proteína de soja	Coacervação	92	McClements (2015)
Polifenóis	Caseína	Emulsificação	80	Gouin (2004)

3.1 Proteínas lácteas

As caseínas, que representam aproximadamente 80% das proteínas totais do leite, formam estruturas coloidais compostas por α 1-caseína, α 2-caseína, β -caseína e κ -caseína. Essas micelas são estabilizadas por fosfato de cálcio coloidal (Holland et al., 2014) e apresentam alta estabilidade térmica, tornando-as ideais para encapsular compostos sensíveis ao calor (Sadiq et al., 2021).

Essas micelas criam um núcleo hidrofóbico e uma superfície hidrofílica, permitindo encapsular diversos compostos bioativos. Compostos lipofílicos (como curcumina, carotenoides, ácidos graxos ômega-3) podem ser aprisionados no núcleo hidrofóbico das micelas de caseína, protegendo-os da oxidação e melhorando a solubilidade em ambientes aquosos (Sadiq et al., 2021). Compostos bioativos hidrofílicos (como polifenóis, peptídeos, vitaminas) interagem com regiões carregadas e polares na superfície da caseína, estabilizando os compostos na solução (Casanova et al., 2021).

As caseínas interagem com compostos bioativos por meio de diversas forças moleculares, aumentando sua estabilidade e solubilidade. Bioativos não polares, como vitaminas lipossolúveis (A, D, E, K) e flavonoides, associam-se com as regiões hidrofóbicas das caseínas. Enquanto isso, compostos bioativos carregados positiva ou negativamente ligam-se às caseínas devido à sua natureza anfifílica, como observado nos complexos eletrostáticos formados com polifenóis e peptídeos (Charlton et al., 2002). Além disso, bioativos contendo grupos hidroxila ou carboxila, como compostos fenólicos e antioxidantes, estabelecem ligações de hidrogênio com as caseínas, melhorando ainda mais sua solubilidade e estabilidade (Van De Langerijt et al., 2023).

Diversos estudos exploraram o uso de caseínas como agentes encapsulantes de compostos bioativos. Pan et al. (2013) desenvolveram nanocápsulas de caseína para encapsular curcumina, resultando em aumento significativo da dispersibilidade e da atividade antioxidante. Além disso, Peñalva et al. (2018) encapsularam resveratrol em

nanopartículas de caseína, relatando um aumento de 10 vezes na biodisponibilidade oral em comparação ao composto livre.

A encapsulação dentro das micelas de caseína protege os compostos bioativos de estresses ambientais como variações de pH, temperatura, oxidação e degradação enzimática. Como a caseína sofre digestão controlada no trato gastrointestinal, ela permite a liberação gradual dos bioativos, melhorando sua absorção e biodisponibilidade.

Em contraste, as proteínas do soro incluem β -lactoglobulina, α -lactoalbumina, imunoglobulinas e lactoferrina (Haraguchi et al., 2006). A β -lactoglobulina se destaca por seu potencial de ligação a minerais, vitaminas lipofílicas e lipídeos, facilitando a incorporação de cálcio, zinco e antioxidantes como α -tocoferol e retinol. Essa propriedade é aproveitada nos processos de encapsulamento, garantindo a liberação eficiente dos compostos bioativos (Somchue et al., 2009).

A α -lactoalbumina é uma glicoproteína globular composta por 123 resíduos de aminoácidos, com peso molecular de aproximadamente 14,2 kDa (Ge et al., 2024). Sua estrutura terciária é estabilizada por interações hidrofóbicas, pontes dissulfeto e sua capacidade de se ligar a íons metálicos como o cálcio (Edwards & Jameson, 2020). Com estabilidade térmica moderada, essa proteína torna-se suscetível à desnaturação em temperaturas acima de 80 °C, especialmente na ausência de cátions estabilizantes (Permyakov & Berliner, 2000). A presença de cálcio desempenha papel crucial na manutenção de sua estrutura e funcionalidade, principalmente em processos que envolvem tratamento térmico e encapsulamento de compostos bioativos (Kimpel & Schmitt, 2015).

Compostos bioativos hidrofílicos, incluindo vitaminas hidrossolúveis e ácidos fenólicos, podem se associar com regiões polares das proteínas do soro, principalmente por meio de ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas (Zhang et al., 2014). Essa ligação confere maior estabilidade aos bioativos ao protegê-los da degradação causada por oxidação, variações de pH ou exposição à luz. Por exemplo, polifenóis como ácido cafeico e ácido gálico demonstraram formar complexos estáveis com β -lactoglobulina, aumentando sua capacidade antioxidante e retenção em matrizes alimentares (Barbiroli et al., 2022).

Vulić et al. (2019) investigaram o impacto da digestão gastrointestinal na liberação e biodisponibilidade de carotenoides e compostos fenólicos isolados de resíduo de pimentão vermelho, encapsulados com proteínas do soro usando técnicas de secagem por pulverização e liofilização. Os compostos fenólicos foram mais estáveis que os carotenoides, apresentando liberação gradual em comparação à liberação rápida dos

carotenoides sob condições intestinais nas primeiras seis horas. A encapsulação com proteínas isoladas do soro protegeu os compostos bioativos de mudanças no pH intestinal e da atividade enzimática, levando a melhorias significativas na biodisponibilidade, bem como nas propriedades nutricionais e visuais.

Por outro lado, compostos bioativos hidrofóbicos, incluindo vitaminas lipossolúveis (por exemplo, vitamina D), carotenoides e curcumina, podem ser aprisionados nos núcleos hidrofóbicos das estruturas das proteínas do soro (Xie et al., 2022). A capacidade de ligação da β -lactoglobulina é particularmente notável devido à presença de um bolsão hidrofóbico capaz de acomodar pequenas moléculas não polares (Liu et al., 2017). Por exemplo, D'Onofre Couto et al. (2021) otimizaram a produção de nanoestruturas de β -lactoglobulina e as aplicaram como carreadores de moléculas bioativas, alcançando altas eficiências de encapsulamento para compostos como quercetina, rutina, naringina e vitamina B2. Além disso, Liu et al. (2018) desenvolveram nanocomplexos à base de β -lactoglobulina compostos por oligossacarídeos de quitosana para a liberação de astaxantina, melhorando sua estabilidade e proporcionando liberação prolongada em sucos gastrointestinais simulados.

Em valores de pH abaixo do ponto isoelétrico, as proteínas do soro adquirem carga positiva, permitindo interação eletrostática com a superfície carregada negativamente das células probióticas (Burgain et al., 2015). Isso leva à formação de um revestimento protetor ao redor das células, reduzindo a suscetibilidade a estresses térmicos e ácidos. Além disso, interações hidrofóbicas entre moléculas de proteína do soro e superfícies microbianas contribuem para a formação de matrizes de encapsulamento estáveis. Por exemplo, Burgain et al. (2011) demonstraram que, em pH abaixo do ponto isoelétrico, as proteínas do soro adquirem carga positiva, permitindo interações eletrostáticas com a superfície carregada negativamente das células probióticas. Isso resulta na formação de um revestimento protetor ao redor das células, reduzindo sua suscetibilidade a estresses térmicos e ácidos.

As proteínas do soro são amplamente utilizadas em sistemas de microencapsulamento, como secagem por pulverização, liofilização ou coacervação complexa, para melhorar a viabilidade dos probióticos, fornecendo uma barreira física e bioquímica contra condições ambientais adversas. Esses sistemas também podem ser ajustados para obter propriedades de liberação controlada em condições gastrointestinais. Além disso, as proteínas do soro podem atuar como substrato nutricional, promovendo o crescimento e a atividade metabólica dos probióticos, contribuindo assim para seu

desempenho funcional em formulações simbióticas (Vanden Braber et al., 2020).

Saghaei, Ariaii e Motamedzadegan (2025) desenvolveram um tapete de nanofibras de proteína do soro por eletrofiação para nanoencapsular ômega-3, o que aumentou a estabilidade térmica do composto promovendo interações fortes entre a molécula bioativa e o material de parede.

No geral, a natureza multifuncional das proteínas do soro as torna componentes valiosos no desenvolvimento de sistemas de entrega de compostos bioativos e probióticos, melhorando sua estabilidade, bioacessibilidade e eficácia terapêutica em alimentos funcionais e aplicações nutraceuticas.

3.2 Proteínas do ovo

Os ovos são uma rica fonte de proteínas de alta qualidade, contendo uma ampla variedade de proteínas estruturais e funcionais com diversas propriedades físico-químicas. Essas proteínas estão distribuídas principalmente entre a clara (albumina) e a gema, cada uma contribuindo com estruturas moleculares e funcionalidades biológicas distintas (Damodaran e Paraf, 2017). As principais proteínas encontradas nos ovos incluem ovalbumina, ovotransferrina, ovomucóide, lisozima e avidina na albumina, e lipovitelinhas, fosvitina e livetina na gema (Razi et al., 2023).

A ovalbumina é a proteína mais abundante da clara, correspondendo a aproximadamente 54% das proteínas totais da albumina (Da Silva et al., 2015). Trata-se de uma glicoproteína monomérica com peso molecular de ~45 kDa, composta por 385 resíduos de aminoácidos, e sua estrutura primária inclui vários resíduos de serina, ácido aspártico e ácido glutâmico, contribuindo para sua natureza relativamente ácida ($pI \approx 4,6$) (Dhanapala et al., 2015). A ovalbumina possui alto conteúdo de α -hélices (~30–40%) e forma uma estrutura terciária globular compacta estabilizada por ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas, mas não possui pontes dissulfeto (Savadkoobi et al., 2016).

A ovotransferrina representa aproximadamente 12–13% das proteínas da clara e é uma glicoproteína com peso molecular de ~77 kDa, composta por dois domínios capazes de ligar um íon férrico (Fe^{3+}) cada, em um complexo sinérgico com um ânion bicarbonato (Jiang et al., 2020). A proteína apresenta extensas regiões de folhas β e é estruturalmente homóloga à transferrina sérica, cuja atividade de ligação ao ferro contribui para suas propriedades antimicrobianas (Legros et al., 2021).

Já o ovomucóide representa cerca de 11% das proteínas da clara e é uma proteína

altamente glicosilada com peso molecular de ~28 kDa, composta por três domínios inibidores de serino proteases do tipo Kazal, os quais conferem resistência a enzimas proteolíticas como a tripsina (Nurliyani et al., 2023). A molécula contém nove ligações dissulfeto e teor significativo de carboidratos (~25%), o que contribui para sua elevada estabilidade térmica (Martos et al., 2011).

As proteínas do ovo podem formar ligações eletrostáticas e de hidrogênio com moléculas hidrofílicas como polifenóis, peptídeos e vitaminas (por exemplo, do complexo B) (Shahidi e Dissanayaka, 2023). Suas cadeias laterais polares (como serina, treonina, glutamina) facilitam as interações com grupos hidroxila e amino dos compostos hidrofílicos, aumentando a proteção das moléculas bioativas (Li et al., 2021).

Devido à sua natureza anfífilica, a ovalbumina, a ovotransferrina e o ovomucóide podem encapsular ou se ligar a compostos lipofílicos como carotenoides, óleos essenciais, curcumina e ácidos graxos (Akman et al., 2022). Resíduos de aminoácidos não polares (como leucina, isoleucina, fenilalanina) formam bolsões hidrofóbicos que aprisionam moléculas lipofílicas. Por exemplo, Akman et al. (2022) desenvolveram nanopartículas de ovalbumina carregadas com curcumina e caracterizaram suas propriedades estruturais e bioativas. O estudo demonstrou que o processo de encapsulamento aumentou a atividade antioxidante da curcumina, indicando que as nanopartículas de ovalbumina podem servir como um sistema viável para a entrega de curcumina em alimentos e outros sistemas de liberação de bioativos.

3.3 Proteínas da carne

As proteínas da carne são amplamente classificadas em miofibrilares, sarcoplasmáticas e estromais (Lee et al., 2024). As proteínas miofibrilares (por exemplo, miosina, actina, tropomiosina) representam 50–55% das proteínas totais do músculo, apresentando estrutura fibrosa, alto peso molecular e múltiplos domínios com resíduos hidrofóbicos e carregados (Xiong, 1994). As proteínas sarcoplasmáticas (por exemplo, mioglobina, enzimas) correspondem a 25–30% das proteínas musculares, sendo geralmente globulares, solúveis em água e ricas em aminoácidos polares (Kim et al., 2005). Por fim, as proteínas estromais (por exemplo, colágeno, elastina) estão presentes no tecido conjuntivo e são caracterizadas por sequências repetitivas de glicina, prolina e hidroxiprolina, formando hélices triplas (Shoulders e Raines, 2009).

Essas proteínas possuem grupos funcionais (por exemplo, amina, carboxila,

hidroxila, tiol) que participam de diversas interações químicas. Compostos bioativos hidrofílicos, como polifenóis, peptídeos e vitaminas solúveis em água, interagem com resíduos polares (como serina, treonina, glutamina) nas proteínas da carne, formando ligações de hidrogênio com grupos hidroxila, carboxila ou amina dos bioativos (Pogorzelska-Nowicka et al., 2018). Além disso, cadeias laterais com carga positiva ou negativa (como lisina, arginina, glutamato) se ligam a moléculas de carga oposta.

Compostos hidrofóbicos como carotenoides, óleos essenciais e vitaminas lipossolúveis interagem com resíduos de aminoácidos não polares (como leucina, valina, fenilalanina), criando regiões hidrofóbicas que acomodam os bioativos lipossolúveis (Dissanayake e Bandara, 2024). Um capítulo recente publicado pela Springer discute o uso de compostos bioativos em produtos cárneos, incluindo sua encapsulação em formas como nanoemulsões e microcápsulas. O capítulo destaca que a encapsulação pode aumentar a estabilidade desses compostos durante o processamento e armazenamento, além de auxiliar em mecanismos de liberação controlada. Embora o foco seja em diversas técnicas de encapsulamento, o texto oferece insights sobre o potencial das proteínas da carne na encapsulação de ingredientes bioativos (Sharma e Mohite, 2025).

3.4 Proteínas vegetais

Com o crescente interesse por alternativas sustentáveis e de origem vegetal, as proteínas vegetais têm ganhado destaque como agentes encapsulantes devido à sua ampla disponibilidade, sustentabilidade ambiental, composição de aminoácidos e propriedades tecno-funcionais distintas (Poore e Nemecek, 2018). As principais fontes incluem leguminosas (por exemplo, soja, ervilha, lentilha), cereais (como trigo, arroz, milho) e pseudocereais (como quinoa e amaranto) (Zhang et al., 2024).

As proteínas vegetais são compostas principalmente por polipeptídeos com ampla variação de pesos moleculares e conformações estruturais. Elas são geralmente classificadas com base na solubilidade em quatro categorias: albuminas (solúveis em água), globulinas (solúveis em sal), prolaminas (solúveis em álcool) e glutelinas (solúveis em meio alcalino) (Kolpakova e Byzov, 2024).

A proteína da soja é composta principalmente por glicinina e β -conglucina, ambas globulares e estabilizadas por ligações dissulfeto (Yang et al., 2024). Essas proteínas apresentam excelente capacidade emulsificante e estabilidade térmica, sendo amplamente utilizadas em processos de encapsulamento (Sharif et al., 2018). As proteínas da ervilha,

compostas predominantemente por legumina e vicilina, são conhecidas pela forte capacidade de formação de gel e interações estáveis com compostos bioativos (Lam et al., 2018). Por outro lado, a proteína do arroz é composta principalmente por prolaminas—proteínas hidrofóbicas que interagem com compostos lipofílicos e demonstram alta resistência térmica (Perrechil et al., 2021).

Compostos hidrofílicos como polifenóis, peptídeos e vitaminas solúveis em água (por exemplo, complexo B, vitamina C) interagem com proteínas vegetais por mecanismos não covalentes. Ligações de hidrogênio ocorrem via grupos hidroxila, amida e carboxila das cadeias laterais proteicas. Interações eletrostáticas são estabelecidas entre aminoácidos carregados (como lisina, arginina, ácido glutâmico) e grupos funcionais ionizados dos bioativos, com força e natureza dessas interações influenciadas por pH e força iônica (Cserhádi e Szögyi, 1990).

Em estudo de Tumbas Šaponjac et al. (2017), as proteínas de soja apresentaram maior eficiência de encapsulamento para extrato de bagaço de cereja azeda (94,9%) em comparação às de soro de leite (90,1%). Embora ambos os tipos de microcápsulas tenham mostrado retenção semelhante de polifenóis durante seis semanas a 25 °C, as partículas com proteína de soja foram mais eficazes na retenção de antocianinas e estabilidade da cor. Além disso, micropartículas de soja apresentaram menor taxa de degradação antioxidante. Pereira Souza et al. (2017) relataram que o isolado proteico de soja estabilizou eficientemente extratos ricos em antocianinas do bagaço de jabuticaba (*Plinia cauliflora*), prolongando sua vida útil.

As proteínas vegetais também mostram afinidade por compostos hidrofóbicos como carotenoides, óleos essenciais, curcumina e vitaminas lipossolúveis (A, D, E e K). Resíduos de aminoácidos não polares (por exemplo, leucina, valina, fenilalanina) interagem com bioativos lipofílicos. Certas proteínas—especialmente prolaminas como a zeína—podem autoagregar-se em estruturas coloidais capazes de encapsular e estabilizar compostos hidrofóbicos (Gomes e Sobral, 2021).

Wang et al. (2024) avaliaram proteínas de soja e de soro como materiais de parede para microencapsular curcumina. O estudo demonstrou maior estabilidade gastrointestinal e absorção de curcumina para microcápsulas com proteína de soja, mas menor eficiência de encapsulamento, destacando um aspecto crítico a ser explorado.

Wang et al. (2021) aplicaram uma variação de pH (7-12-7) para encapsular curcumina em nanopartículas reconstituídas de soja, alcançando eficiência de 97,43% e melhorias em solubilidade, estabilidade térmica e fotoproteção. Yuan et al. (2021)

mostraram que nanopartículas de soja obtidas por hidrólise enzimática parcial protegem curcumina durante digestão gastrointestinal simulada e aumentam sua bioacessibilidade (80%) em comparação à curcumina livre (10%).

Proteínas vegetais também influenciam a viabilidade e funcionalidade de probióticos (por exemplo, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*) via interações com a parede celular microbiana, oferecendo proteção. Durante gelificação ou encapsulamento, formam matrizes que imobilizam as células, protegendo-as de condições ácidas ou oxidativas (Koh et al., 2022).

Liang et al. (2024) desenvolveram nanopartículas de proteína de ervilha com ácido clorogênico pelo método antissolvente. As nanopartículas apresentaram eficiência de 61,2% e aumentaram a biodisponibilidade do ácido clorogênico em 7,75%. A atividade antioxidante também melhorou durante digestão *in vitro*.

Proteínas do arroz, compostas por prolaminas e glutelinas, possuem natureza hidrofóbica e alta resistência térmica, favoráveis para encapsular compostos lipofílicos e garantir estabilidade em condições gastrointestinais simuladas (Amagliani et al., 2017). Sua baixa solubilidade em pH neutro pode ser corrigida por desnaturação térmica e ajustes de pH, aumentando sua aplicação em sistemas micro e nanoencapsulados (Perrechil et al., 2021). Gomes e Kurozawa (2020) mostraram que modificações enzimáticas das proteínas de arroz melhoram suas propriedades funcionais, tornando-as eficazes na encapsulação de óleo de linhaça.

Proteínas do trigo, compostas por gluteninas e gliadinas, formam redes tridimensionais com elevado potencial de gelificação e resistência mecânica, protegendo compostos bioativos sensíveis (Rosenberg et al., 2018). A fração glutenina contribui para estabilidade estrutural por meio de ligações dissulfeto (Liao et al., 2012).

Proteínas da aveia, como avenalinas e aveninas, apresentam boa solubilidade e propriedades emulsificantes e formadoras de filme (Kumar et al., 2021). Essas características favorecem a encapsulação de compostos hidrofílicos. Além disso, exibem atividade antioxidante intrínseca, protegendo bioativos contra oxidação (McLauchlan et al., 2024). Wang et al. (2024) investigaram a formação de complexos entre proteína de aveia e pectina de alto teor de metoxila, observando que ajustes de pH influenciam a estabilidade da emulsão e a eficiência de encapsulamento de curcumina, destacando o potencial da combinação de proteínas vegetais e polissacarídeos.

Proteínas extraídas de outras leguminosas, como feijão, grão-de-bico e lentilha, apresentam composição diversa (albuminas, globulinas e prolaminas) e propriedades

funcionais versáteis (Afzaal et al., 2021). São conhecidas pela capacidade de formar géis, resistência térmica e interações com compostos hidrofílicos e lipofílicos (Gharibzahedi e Smith, 2021). Quintero Quiroz et al. (2020) avaliaram a estabilidade térmica de compostos bioativos de extrato de urucum encapsulados por gelificação iônica com proteínas vegetais de quinoa, lentilha, soja e caseinato de sódio. As eficiências de encapsulamento variaram de 58% a 80%, com melhor estabilidade térmica de polifenóis e bixina após 12 dias a 65 °C, demonstrando a capacidade protetora dessas proteínas.

4 Técnicas de encapsulamento

A encapsulação de compostos bioativos é uma estratégia amplamente utilizada para melhorar sua estabilidade, solubilidade, biodisponibilidade e liberação controlada. Diferentes técnicas podem ser empregadas dependendo das propriedades do composto bioativo e da aplicação desejada (Srivastava et al., 2024). Cada técnica de encapsulamento possui vantagens específicas e aplicações variadas, dependendo do composto bioativo e da funcionalidade desejada. A escolha da técnica depende de fatores como estabilidade, perfil de liberação, escalabilidade e uso pretendido nas indústrias alimentícia, farmacêutica ou cosmética (Shah, 2020) (Tabela 4).

Tabela 4 – Técnicas de encapsulamento para compostos bioativos.

Técnica	Princípio	Vantagens	Desvantagens	Referências
Spray Drying	Envolve a atomização de uma emulsão contendo o composto bioativo e o material de parede em uma corrente de ar quente, formando micropartículas secas.	Custo-efetiva, rápida, escalável, processo contínuo; melhora a estabilidade do bioativo, aumenta a solubilidade e dispersibilidade; propriedades de partículas personalizáveis.	Alta exposição térmica pode degradar compostos sensíveis; baixa eficiência de encapsulamento para compostos hidrofóbicos; alto consumo de energia, aglomeração de pó e alta higroscopicidade.	Gharsallaoui et al. (2007), Fritsch et al. (2017), Tonon et al. (2010), Farahmandi et al. (2021).

Coacervação Complexa	Baseada em interações eletrostáticas entre polímeros carregados positivamente e negativamente, formando uma cápsula ao redor do composto bioativo.	Alta eficiência de encapsulamento, proteção contra degradação, liberação controlada de bioativos; biodegradável, biocompatível, adequada para compostos hidrofílicos e hidrofóbicos.	Altamente dependente do pH e da concentração de sal; nem sempre adequada para solventes orgânicos; requer ajustes finos nas proporções de polímeros, pH, temperatura e condições de mistura; instabilidade durante o armazenamento; potencial alergenicidade de alguns polímeros (gelatina).	Uppal et al. (2020), Sing & Perry (2020), Aloys et al. (2016).
Lipossomos	Vesículas compostas por bicamadas lipídicas que podem encapsular compostos hidrofóbicos e hidrofílicos, protegendo-os da degradação e aumentando sua absorção.	Proteção contra degradação enzimática, luz e variações de pH; estende a vida útil; capaz de encapsular compostos hidrofílicos e hidrofóbicos; geralmente não tóxicos, biodegradáveis e bem tolerados em sistemas biológicos; liberação controlada e direcionada.	Custos de produção elevados, estabilidade limitada, curto tempo de circulação no corpo, risco de liberação de fármaco durante armazenamento prolongado ou sob variações de temperatura; potencial de oxidação e hidrólise.	Mozafari et al. (2005), Pattni et al. (2015), Shantanu (2023).
Nanoemulsões	Sistemas coloidais compostos por gotas nanométricas óleo-em-água ou água-em-óleo estabilizadas por surfactantes.	Melhoram a biodisponibilidade de bioativos hidrofóbicos, proteção contra oxidação, luz e calor, aumentando	Problemas de estabilidade como separação de fases ou coalescência; produção cara; alguns	McClements et al. (2012), Punyya et al. (2024), Abaszadeh et al. (2023), Scapinello et al.

	Melhoram a solubilidade de compostos lipofílicos.	a vida útil; liberação controlada; formuladas com óleos e surfactantes vegetais, consideradas biocompatíveis e não tóxicas.	surfactantes e óleos podem ter potencial tóxico; desafios na escalabilidade em termos de custo e estabilidade; falta de diretrizes regulatórias claras em alguns países.	(2024).
Complexação com Ciclodextrinas	Ciclodextrinas formam complexos de inclusão com compostos bioativos, melhorando sua solubilidade, estabilidade e biodisponibilidade.	Melhora a solubilidade e biodisponibilidade; protege compostos bioativos da degradação por fatores ambientais como luz, oxigênio e temperatura; liberação controlada; baixa toxicidade e biocompatibilidade.	Eficiência de encapsulamento limitada para compostos que não se encaixam bem na cavidade hidrofóbica das ciclodextrinas; possível formação de complexos instáveis; pode ser caro de produzir, limitando a comercialização em larga escala; eficácia limitada para liberação rápida; frequentemente requer modificação para melhorar solubilidade ou estabilidade.	Loftsson & Brewster (2010), Sarabia-Vallejo (2023), dos Santos Lima et al. (2019).
Extrusão	O composto bioativo é disperso em uma matriz polimérica fundida, seguido de resfriamento para formar micropartículas ou filamentos.	Altamente escalável, liberação controlada, proteção contra degradação por luz, oxigênio e umidade; ampla variedade de materiais encapsulantes (amido, lipídios, proteínas e polissacarídeos); homogeneidade e uniformidade.	Alto consumo de energia, degradação térmica de compostos sensíveis, controle limitado sobre a cinética de liberação dependendo da matriz, condições de extrusão e características do bioativo; possíveis alterações estruturais,	Gouin (2004), Repka et al. (2023).

			processo complicado.	
Polimerização Interfacial	Produção de nanopartículas poliméricas, onde monômeros reagem na interface de uma emulsão, formando cápsulas ao redor do composto bioativo.	Liberação controlada, alta eficiência de encapsulamento, proteção de bioativos sensíveis, versátil (pode encapsular bioativos hidrofílicos, lipofílicos e anfífilicos), capacidade de formar nanopartículas e microcápsulas.	Uniformidade do polímero pode ser desafiadora, potencial toxicidade de solventes residuais, escalabilidade limitada (efetiva em escala laboratorial), matérias-primas e equipamentos podem ser caros, polimerização desigual.	Dubey et al. (2009), Ricardo et al. (2021), Song et al. (2017).
Electrospinning	Utiliza um campo elétrico para produzir fibras nanométricas contendo compostos bioativos, permitindo liberação controlada e proteção contra degradação.	Alta razão área superficial/volume, possibilidade de manipulação do diâmetro das fibras, morfologia e porosidade; encapsulamento de compostos bioativos hidrofílicos e hidrofóbicos; liberação controlada; uso mínimo de solventes tóxicos.	Requer controle preciso de múltiplas variáveis (concentração do polímero, voltagem, distância do coletor e evaporação do solvente); resíduos de solvente no produto final; baixo rendimento para produção em larga escala; instabilidade das nanofibras ao longo do tempo; controle limitado sobre a carga do fármaco e perfil de liberação.	Torres-Giner (2008), Gaydhane et al. (2023), Bayat et al. (2024).
Hidrogéis	Redes tridimensionais de polímeros hidrofílicos que podem absorver grandes quantidades de água, sendo úteis para liberação controlada de compostos bioativos.	Biocompatibilidade e biodegradabilidade; alta capacidade de retenção de água, liberação controlada e direcionada; entrega não invasiva de compostos bioativos; podem ser formulados para	Baixa resistência mecânica e suscetibilidade à deformação sob estresse; sensíveis a fatores ambientais como temperatura e umidade; dificuldade de escalonamento da produção;	Peppas et al. (2006), Saravana et al. (2025), El Hadrami et al. (2010).

		aplicações injetáveis ou tópicas; encapsulam ampla gama de bioativos (hidrofílicos, hidrofóbicos, proteínas, enzimas ou peptídeos).	perfil de liberação imprevisível; agentes de reticulação podem ser tóxicos ou requerer purificação adicional.	
--	--	---	---	--

Compostos bioativos encapsulados encontram aplicações diversas nas indústrias agrícola, alimentícia e farmacêutica. Estes incluem polifenóis (como flavonoides, ácidos fenólicos, resveratrol e catequinas do chá verde), curcumina, carotenoides (incluindo β -caroteno, licopeno e astaxantina), probióticos (por exemplo, *Lactobacillus* spp., *Bifidobacterium* spp.), óleos essenciais (como orégano, tomilho, hortelã-pimenta, canela e lavanda), ácidos graxos ômega-3, vitaminas (A, C, D e E), peptídeos antimicrobianos (ex.: nisina), além de compostos bioativos como quercetina, kaempferol, ibuprofeno e gel de aloe vera, que também se beneficiam das técnicas de encapsulamento (El Hadrami et al., 2010; Đorđević et al., 2015; Pachuaui et al., 2021; Zabot et al., 2022).

5 Conclusão

O encapsulamento de compostos bioativos utilizando proteínas tem se mostrado uma solução eficaz para superar desafios relacionados à estabilidade, biodisponibilidade e funcionalidade desses compostos em alimentos funcionais. As interações específicas entre proteínas e compostos bioativos variam conforme a natureza química de ambos, sendo que proteínas vegetais, como o isolado proteico de soja, apresentam desempenho superior para compostos hidrofílicos, enquanto proteínas de origem animal, como a proteína do soro do leite, demonstram maior eficiência na encapsulação de compostos lipofílicos.

Para enfrentar esses desafios, a formação de complexos proteína-polissacarídeo e a modificação das proteínas antes do encapsulamento têm mostrado resultados promissores na melhoria da encapsulação de compostos lipofílicos. A aplicação de tecnologias como a autoagregação (*self-assembly*) e a modificação proteica ampliou as possibilidades de encapsulamento, resultando em sistemas mais estáveis e eficientes.

Esses estudos destacam a importância de compreender a estrutura dos compostos bioativos-alvo, da seleção adequada de proteínas como materiais de parede, bem como das

técnicas e tecnologias disponíveis para obtenção de partículas bioativas. Portanto, pesquisas futuras devem priorizar o desenvolvimento de sistemas de encapsulamento mais eficientes, expolarando a sinergia entre proteínas, bioativos e tecnologias avançadas, ao mesmo tempo em que considerem a escalabilidade e a sustentabilidade das soluções propostas.

6 Referências

Abaszadeh, Farzad, et al. “Nanoemulsions Challenges and Future Prospects as a Drug Delivery System”. *Current Trends in Green Nano-Emulsions*, organizado por Azamal Husen et al., Springer Nature Singapore, 2023, p. 217–43. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-981-99-5398-1_13.

Abdi-Moghadam, Zohreh, et al. “RETRACTED: The Significance of Essential Oils and Their Antifungal Properties in the Food Industry: A Systematic Review”. *Heliyon*, vol. 9, nº 11, novembro de 2023, p. e21386. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21386>.

Abdul-Al, Mohamed, et al. “Encapsulation Techniques Overview”. *Principles of Biomaterials Encapsulation : Volume One*, Elsevier, 2023, p. 13–36. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85947-9.00002-9>.

Aditya, N. P., et al. “Encapsulation Systems for the Delivery of Hydrophilic Nutraceuticals: Food Application”. *Biotechnology Advances*, vol. 35, nº 4, julho de 2017, p. 450–57. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.03.012>.

Afzaal, Muhammad, et al. “ENCAPSULATING PROPERTIES OF LEGUME PROTEINS:

RECENT UPDATES & PERSPECTIVES”. *International Journal of Food Properties*, vol. 24, no 1, janeiro de 2021, p. 1603–14. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1987456>.

- Akman, Perihan Kubra, et al. "Fabrication and characterization of curcumin loaded ovalbumin nanocarriers and bioactive properties". *Food Science and Technology*, vol. 42, 2022, p. e38421. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1590/fst.38421>.
- Akoh, Casimir C., organizador. *Food Lipids*. 0 ed, CRC Press, 2017. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1201/9781315151854>.
- Akolade, Jubril Olayinka, et al. "Encapsulation in Chitosan-Based Polyelectrolyte Complexes Enhances Antidiabetic Activity of Curcumin". *Journal of Functional Foods*, vol. 35, agosto de 2017, p. 584–94. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.023>.
- Alberts, Adina, et al. "Vitamin C: A Comprehensive Review of Its Role in Health, Disease Prevention, and Therapeutic Potential". *Molecules*, vol. 30, nº 3, fevereiro de 2025, p. 748. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules30030748>.
- Aloys, H., Korma, S. A., Alice, T. M., Chantal, N., Ali, A. H., Abed, S. M., & Ildephonse, H. (2016). Microencapsulation by complex coacervation: Methods, techniques, benefits, and applications-A review. *American Journal of Food Science and Nutrition Research*, 3(6), 188-192.
- Amagliani, Luca, et al. "The Composition, Extraction, Functionality and Applications of Rice Proteins: A Review". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 64, junho de 2017, p. 1–12. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.008>.
- Amiri, Saber, et al. "Effect of the Molecular Structure and Mechanical Properties of Plant-Based Hydrogels in Food Systems to Deliver Probiotics: An Updated Review". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 64, nº 8, março de 2024, p. 2130–56. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2121260>.

- Anand, Amit, et al. “Inulin as a Prebiotic and Its Effect on Gut Microbiota”. *Inulin for Pharmaceutical Applications*, organizado por Wasim Akram et al., Springer Nature Singapore, 2025, p. 113–35. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-981-97-9056-2_6.
- Añazco, Carolina, et al. “Exploring the Interplay between Polyphenols and Lysyl Oxidase Enzymes for Maintaining Extracellular Matrix Homeostasis”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, nº 13, julho de 2023, p. 10985. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/ijms241310985>.
- Andrès, Emmanuel, et al. “Fat-Soluble Vitamins A, D, E, and K: Review of the Literature and Points of Interest for the Clinician”. *Journal of Clinical Medicine*, vol. 13, nº 13, junho de 2024, p. 3641. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/jcm13133641>.
- Ashour, Aziza Said, et al. “A review on saponins from medicinal plants: chemistry, isolation, and determination”. *Journal of Nanomedicine Research*, vol. 7, nº 4, fevereiro de 2019, p. 282–88. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.15406/jnmr.2019.07.00199>.
- Baky, Mostafa H., et al. “Phytochemical and Biological Diversity of Triterpenoid Saponins from Family Sapotaceae: A Comprehensive Review”. *Phytochemistry*, vol. 202, outubro de 2022, p. 113345. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113345>.
- Barbiroli, Alberto, et al. “Beta-Lactoglobulin as a Model Food Protein: How to Promote, Prevent, and Exploit Its Unfolding Processes”. *Molecules*, vol. 27, nº 3, fevereiro de 2022, p. 1131. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules27031131>.
- Bayat, Fereshteh, et al. “A Precise Look at Electrospinning Parameters in Fabricating the Polymeric Nanofibers: A Review on Synthetic and Natural Polymers”.

Journal of Pharmaceutical Investigation, vol. 54, no 6, novembro de 2024, p. 699–750.

DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s40005-024-00690-x>.

Bergstrom, T., et al. “Vitamins at Physiological Levels Cause Oxidation to the DNA Nucleoside Deoxyguanosine and to DNA--Alone or in Synergism with Metals”. *Mutagenesis*, vol. 27, n° 4, julho de 2012, p. 511–17. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1093/mutage/ges013>.

Berry Ottaway, P. “Stability of Vitamins during Food Processing and Storage”. *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages*, Elsevier, 2010, p. 539–60. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1533/9781845699260.3.539>.

Besharati, Maghsoud, e Maximilian Lackner. “Bioactive Peptides: A Review”. *The EuroBiotech Journal*, vol. 7, n° 4, outubro de 2023, p. 176–88. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.2478/ebtj-2023-0013>.

Bhushan, Bharat, et al. “Beyond Colors: The Health Benefits of Maize Anthocyanins”. *Applied Food Research*, vol. 4, n° 1, junho de 2024, p. 100399. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100399>.

Britton, George. “Getting to Know Carotenoids”. *Methods in Enzymology*, vol. 670, Elsevier, 2022, p. 1–56. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2022.04.005>.

Burgain, J., et al. “Encapsulation of Probiotic Living Cells: From Laboratory Scale to Industrial Applications”. *Journal of Food Engineering*, vol. 104, n° 4, junho de 2011, p. 467–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.031>.

Burgain, Jennifer, et al. “Impacts of pH-Mediated EPS Structure on Probiotic Bacterial Pili– Whey Proteins Interactions”. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 134,

outubro de 2015, p. 332–38. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2015.06.068>.

Busscher, Henk J., et al. “Specific Molecular Recognition and Nonspecific Contributions to Bacterial Interaction Forces”. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 74, n° 9, maio de 2008, p. 2559–64. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1128/AEM.02839-07>.

Calderón-Ospina, Carlos Alberto, e Mauricio Orlando Nava-Mesa. “B Vitamins in the Nervous System: Current Knowledge of the Biochemical Modes of Action and Synergies of Thiamine, Pyridoxine, and Cobalamin”. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, vol. 26, n° 1, janeiro de 2020, p. 5–13. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1111/cns.13207>.

Campos, Luana Dias, et al. “Collagen Supplementation in Skin and Orthopedic Diseases: A Review of the Literature”. *Heliyon*, vol. 9, n° 4, abril de 2023, p. e14961. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14961>.

Cao, Shixi, et al. “Effects of Saponins on Lipid Metabolism: The Gut–Liver Axis Plays a Key Role”. *Nutrients*, vol. 16, n° 10, maio de 2024, p. 1514. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.3390/nu16101514>.

Casanova, Federico, et al. “Interactions between Caseins and Food-Derived Bioactive Molecules: A Review”. *Food Chemistry*, vol. 359, outubro de 2021, p. 129820. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129820>.

Charlton, Adrian J., et al. “Polyphenol/Peptide Binding and Precipitation”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 50, n° 6, março de 2002, p. 1593–601. *DOI.org (Crossref)*,
<https://doi.org/10.1021/jf010897z>.

Cheng, Yanfen, et al. “Polysaccharide from *Clitocybe Squamulosa*: Gel-Forming Properties

and Its Compound Effect with Food Thickener”. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 260, março de 2024, p. 129474. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129474>.

Cho, Sung-Hee, et al. “Compound K, a Metabolite of Ginseng Saponin, Induces Apoptosis via Caspase-8-Dependent Pathway in HL-60 Human Leukemia Cells”. *BMC Cancer*, vol. 9, nº 1, dezembro de 2009, p. 449. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1186/1471-2407-9-449>.

Choe, Eunok, e David B. Min. “Mechanisms and Factors for Edible Oil Oxidation”.

Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, vol. 5, nº 4, setembro de 2006,

p. 169–86. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x>.

Chugh, Bhawna, e Afaf Kamal-Eldin. “Bioactive Compounds Produced by Probiotics in Food Products”. *Current Opinion in Food Science*, vol. 32, abril de 2020, p. 76–82. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.02.003>.

Ciupei, Daria, et al. “Polyphenols: From Classification to Therapeutic Potential and Bioavailability”. *Foods*, vol. 13, nº 24, dezembro de 2024, p. 4131. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods13244131>.

---. “Polyphenols: From Classification to Therapeutic Potential and Bioavailability”. *Foods*, vol. 13, nº 24, dezembro de 2024, p. 4131. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods13244131>.

Cooney, Janine M., et al. “A Combined Omics Approach to Evaluate the Effects of Dietary Curcumin on Colon Inflammation in the Mdr1a–/– Mouse Model of Inflammatory Bowel Disease”. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, vol. 27, janeiro de 2016, p. 181–92. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2015.08.030>.

- Covas, María-Isabel, et al. “The Effect of Polyphenols in Olive Oil on Heart Disease Risk Factors: A Randomized Trial”. *Annals of Internal Medicine*, vol. 145, no 5, setembro de 2006, p. 333–41. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.7326/0003-4819-145-5-200609050-00006>.
- Cruz, Maria De Fátima Simão Jucá, e Gabriela Moysés Pereira. “Structure-activity relationship of triterpenoid saponins: Biological properties and commercial applicabilities”. *Revista Fitos*, dezembro de 2022. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.32712/2446-4775.2022.1351>.
- Cserhádi, Tibor, e Mária Szögyi. “Hydrophilic Interactions between Charged Amino Acids and the Effect of Ions on the Strength of Interaction”. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, vol. 45, nº 1–2, fevereiro de 1990, p. 79–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1515/znc-1990-1-214>.
- Da Silva, Mylene, et al. “The Family Secrets of Avian Egg-Specific Ovalbumin and Its Related Proteins Y and X”. *Biology of Reproduction*, vol. 93, nº 3, setembro de 2015. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1095/biolreprod.115.130856>.
- Dahiya, Divakar, et al. “Current Status and Future Prospects of Bioactive Molecules Delivered through Sustainable Encapsulation Techniques for Food Fortification”. *Sustainable Food Technology*, vol. 1, nº 4, 2023, p. 500–10. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1039/D3FB00015J>.
- Damodaran, Srinivasan, e Alain Paraf. *Food Proteins and Their Applications*. 1º ed, CRC Press, 2017. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1201/9780203755617>.
- Delaney, John S. “ESOL: Estimating Aqueous Solubility Directly from Molecular Structure”. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, vol. 44, nº 3, maio de 2004, p. 1000–05. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1021/ci034243x>.

- Dhanapala, Pathum, et al. “Cracking the Egg: An Insight into Egg Hypersensitivity”. *Molecular Immunology*, vol. 66, n° 2, agosto de 2015, p. 375–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2015.04.016>.
- Didier, Alexander J., et al. “Antioxidant and Anti-Tumor Effects of Dietary Vitamins A, C, and E”. *Antioxidants*, vol. 12, n° 3, março de 2023, p. 632. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/antiox12030632>.
- Dissanayake, Thilini, e Nandika Bandara. “Protein-Based Encapsulation Systems for Codelivery of Bioactive Compounds: Recent Studies and Potential Applications”. *Current Opinion in Food Science*, vol. 57, junho de 2024, p. 101181. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101181>.
- D’Onofre Couto, Brunna, et al. “Characterization, Techno-Functional Properties, and Encapsulation Efficiency of Self-Assembled β -Lactoglobulin Nanostructures”. *Food Chemistry*, vol. 356, setembro de 2021, p. 129719. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129719>.
- Dos Santos Lima, Bruno, et al. “Inclusion Complex with Cyclodextrins Enhances the Bioavailability of Flavonoid Compounds: A Systematic Review”. *Phytochemistry Reviews*, vol. 18, no 5, outubro de 2019, p. 1337–59. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09650-y>.
- Edwards, Patrick J. B., e Geoffrey B. Jameson. “Structure and Stability of Whey Proteins”. *Milk Proteins*, Elsevier, 2020, p. 251–91. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00007-4>.
- El Hadrami, Abdelbasset, et al. “Chitosan in Plant Protection”. *Marine Drugs*, vol. 8, no 4, março de 2010, p. 968–87. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/md8040968>.
- Enaru, Bianca, et al. “Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation”.

- Antioxidants*, vol. 10, nº 12, dezembro de 2021, p. 1967. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/antiox10121967>.
- Faizal, Ahmad, e Danny Geelen. “Saponins and Their Role in Biological Processes in Plants”. *Phytochemistry Reviews*, vol. 12, nº 4, dezembro de 2013, p. 877–93. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1007/s11101-013-9322-4>.
- Fallahasghari, Elnaz Z., et al. “Lipophilic Bioactive Compounds Nano-Micro Encapsulation via Coaxial Electrohydrodynamic Atomization: A Review”. *Food Hydrocolloids for Health*, vol. 7, junho de 2025, p. 100202. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2025.100202>.
- Fan, Hongxiu, et al. “Review on Plant-Derived Bioactive Peptides: Biological Activities, Mechanism of Action and Utilizations in Food Development”. *Journal of Future Foods*, vol. 2, nº 2, junho de 2022, p. 143–59. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.03.003>.
- Fernandes, Andrêssa Silva, et al. “Introductory Chapter: Carotenoids - A Brief Overview on Its Structure, Biosynthesis, Synthesis, and Applications”. *Progress in Carotenoid Research*, organizado por Leila Queiroz Zepka et al., InTech, 2018. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.5772/intechopen.79542>.
- Fernando, Ilekuttige Priyan Shanura, e Jianping Wu. “Food-Derived Bioactive Peptides: The Gateway to Reach the Full Potential of Food Proteins for Human Health”. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 157, março de 2025, p. 104896. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104896>.
- Fontes-Candia, Cynthia, et al. “Relevance of Protein–Polysaccharide Interactions on Nutritional Quality and Gastrointestinal Digestion of Protein-Based Foods”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 73, nº 9, março de 2025, p. 4998–5004.

DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11949>.

Gaydhane, Mrunalini K., et al. “Electrospun Nanofibres in Drug Delivery: Advances in Controlled Release Strategies”. *RSC Advances*, vol. 13, no 11, 2023, p. 7312–28. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1039/D2RA06023J>.

Ge, Xinyu, et al. “ α -Lactalbumin: Functional Properties and Potential Health Benefits”. *Food Bioscience*, vol. 60, agosto de 2024, p. 104371. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104371>.

Geng, Yaqian, et al. “From Polyphenol to *o*-quinone: Occurrence, Significance, and Intervention Strategies in Foods and Health Implications”. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 22, nº 4, julho de 2023, p. 3254–91. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13182>.

Gharibzahedi, Seyed Mohammad Taghi, e Brennan Smith. “Legume Proteins Are Smart Carriers to Encapsulate Hydrophilic and Hydrophobic Bioactive Compounds and Probiotic Bacteria: A Review”. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 20, no 2, março de 2021, p. 1250–79. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12699>.

Godoy, Helena Teixeira, et al. “Degradation of Vitamins”. *Chemical Changes During Processing and Storage of Foods*, Elsevier, 2021, p. 329–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817380-0.00008-7>.

Gomes, Andresa, e Paulo José Do Amaral Sobral. “Plant Protein-Based Delivery Systems: An Emerging Approach for Increasing the Efficacy of Lipophilic Bioactive Compounds”. *Molecules*, vol. 27, nº 1, dezembro de 2021, p. 60. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/molecules27010060>.

Gomes, Matheus Henrique Gouveia, e Louise Emy Kurozawa. “Improvement of

- the Functional and Antioxidant Properties of Rice Protein by Enzymatic Hydrolysis for the Microencapsulation of Linseed Oil”. *Journal of Food Engineering*, vol. 267, fevereiro de 2020, p. 109761. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109761>.
- Gonçalves, A. C., e G. V. Portari. “The B-Complex Vitamins Related to Energy Metabolism and Their Role in Exercise Performance: A Narrative Review”. *Science & Sports*, vol. 36, nº 6, dezembro de 2021, p. 433–40. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2020.11.007>.
- Gouin, Sébastien. “Microencapsulation”. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 15, nº 7–8, julho de 2004, p. 330–47. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.10.005>.
- Haraguchi, Fabiano Kenji, et al. “Proteínas do soro do leite: composição, propriedades nutricionais, aplicações no esporte e benefícios para a saúde humana”. *Revista de Nutrição*, vol. 19, nº 4, agosto de 2006, p. 479–88. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1590/S1415-52732006000400007>.
- Hayes, Maria, e Brijesh Tiwari. “Bioactive Carbohydrates and Peptides in Foods: An Overview of Sources, Downstream Processing Steps and Associated Bioactivities”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 16, nº 9, setembro de 2015, p. 22485–508. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/ijms160922485>.
- Holick, Michael F., et al. “Vitamin D and Skin Physiology: A D-Lightful Story”. *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 22, nº S2, dezembro de 2007, p. V28–33. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1359/jbmr.07s211>.
- Holland, John W., e Mike J. Boland. “Post-Translational Modifications of Caseins”. *Milk*

Proteins, Elsevier, 2014, p. 141–68. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405171-3.00005-2>.

Honda, Sari, et al. “Stability of Polyphenols under Alkaline Conditions and the Formation of a Xanthine Oxidase Inhibitor from Gallic Acid in a Solution at pH 7.4”. *Food Science and Technology Research*, vol. 25, nº 1, 2019, p. 123–29. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3136/fstr.25.123>.

Hrncirik, Karel. “Stability of Fat-soluble Vitamins and PUFA in Simulated Shallow-frying”. *Lipid Technology*, vol. 22, nº 5, maio de 2010, p. 107–09. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1002/lite.201000018>.

Hrubša, Marcel, et al. “Biological Properties of Vitamins of the B-Complex, Part 1: Vitamins B1, B2, B3, and B5”. *Nutrients*, vol. 14, nº 3, janeiro de 2022, p. 484. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/nu14030484>.

---. “Biological Properties of Vitamins of the B-Complex, Part 1: Vitamins B1, B2, B3, and B5”. *Nutrients*, vol. 14, nº 3, janeiro de 2022, p. 484. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/nu14030484>.

Huang, Xuefeng, e Lingyi Kong. “Steroidal Saponins from Roots of *Asparagus Officinalis*”. *Steroids*, vol. 71, nº 2, fevereiro de 2006, p. 171–76. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2005.09.005>.

Irfan, Madiha, et al. “Current Trends in the Biosynthesis of Vitamins”. *Recent Advances in Industrial Biochemistry*, organizado por Muhammad Zaffar Hashmi et al., Springer International Publishing, 2024, p. 251–78. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-3-031-50989-6_11.

Islam, Fahadul, et al. “Synergistic Effects of Carotenoids: Therapeutic Benefits on Human Health”. *Process Biochemistry*, vol. 136, janeiro de 2024, p. 254–72. *DOI.org*

(Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2023.11.033>.

Jafari, Davood, et al. “Vitamin C and the Immune System”. *Nutrition and Immunity*, organizado por Maryam Mahmoudi e Nima Rezaei, Springer International Publishing, 2019, p. 81–102. *Springer Link*, https://doi.org/10.1007/978-3-030-16073-9_5.

Jia, Lixia, et al. “Insight into Heavy Metals (Cr and Pb) Complexation by Dissolved Organic Matters from Biochar: Impact of Zero-Valent Iron”. *Science of The Total Environment*, vol. 793, novembro de 2021, p. 148469. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148469>.

Jiang, Yongli, et al. “Structure, Physicochemical and Bioactive Properties of Dietary Fibers from Akebia Trifoliata (Thunb.) Koidz. Seeds Using Ultrasonication/Shear Emulsifying/Microwave-Assisted Enzymatic Extraction”. *Food Research International*, vol. 136, outubro de 2020, p. 109348. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109348>.

Justus, Ariana, et al. “Estabilidade física e química de hidrolisados proteicos de okara microencapsulados por spray drying”. *Brazilian Journal of Food Technology*, vol. 23, 2020, p. e2019135. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1590/1981-6723.13519>.

Kahraman, Osman, et al. *Bilayer-thickness-mediated interactions between integral membrane proteins*. 2016. *DOI.org (Datacite)*, <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1611.00836>.

Kaur, Sumeet, e Madhusweta Das. “Functional Foods: An Overview”. *Food Science and Biotechnology*, vol. 20, nº 4, agosto de 2011, p. 861–75. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1007/s10068-011-0121-7>.

Kellogg, Julianne A., et al. “High β -Glucan Whole Grain Barley Reduces Postprandial Glycemic Response in Healthy Adults—Part One of a Randomized Controlled Trial”.

Nutrients, vol. 17, nº 3, janeiro de 2025, p. 430. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/nu17030430>.

Khan, Muhammad, et al. “Therapeutic Effects of Saponins for the Prevention and Treatment of Cancer by Ameliorating Inflammation and Angiogenesis and Inducing Antioxidant and Apoptotic Effects in Human Cells”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, nº 18, setembro de 2022, p. 10665. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/ijms231810665>.

Kim, Hyo Jin, et al. “Effect of Different Cooking Method on Vitamin E and K Content and True Retention of Legumes and Vegetables Commonly Consumed in Korea”. *Food Science and Biotechnology*, vol. 32, nº 5, abril de 2023, p. 647–58. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01206-9>.

Kim, Young S., et al. “CHARACTERISTICS OF SARCOPLASMIC PROTEINS AND THEIR INTERACTION WITH MYOFIBRILLAR PROTEINS”. *Journal of Food Biochemistry*, vol. 29, nº 5, outubro de 2005, p. 517–32. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2005.00023.x>.

Kimpel, Florian, e Joachim J. Schmitt. “Review: Milk Proteins as Nanocarrier Systems for Hydrophobic Nutraceuticals”. *Journal of Food Science*, vol. 80, nº 11, novembro de 2015. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13096>.

Koh, Wee Yin, et al. “Encapsulated Probiotics: Potential Techniques and Coating Materials for Non-Dairy Food Applications”. *Applied Sciences*, vol. 12, nº 19, outubro de 2022, p. 10005. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/app121910005>.

Kolpakova, V. V., e V. A. Byzov. “Functional characteristics and molecular structural modification of plant proteins. Review”. *Food systems*, vol. 7, nº 3, outubro de 2024,

p. 324–35. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335>.

Krinsky, Norman I., e Elizabeth J. Johnson. “Carotenoid Actions and Their Relation to Health and Disease”. *Molecular Aspects of Medicine*, vol. 26, nº 6, dezembro de 2005, p. 459–

516. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.mam.2005.10.001>.

Kumar, Lokesh, et al. “Oat Proteins: A Perspective on Functional Properties”. *LWT*, vol. 152, dezembro de 2021, p. 112307. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112307>.

Kurnianto, Muhammad Alfid, et al. “Fish-Derived Bioactive Peptide: Bioactivity Potency, Structural Characteristics, and Conventional and Bioinformatics Approaches for Identification”. *Future Foods*, vol. 9, junho de 2024, p. 100386. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100386>.

Kwak, Suryang, et al. “Dissection and Enhancement of Prebiotic Properties of Yeast Cell Wall Oligosaccharides through Metabolic Engineering”. *Biomaterials*, vol. 282, março de 2022, p. 121379. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121379>.

Lam, A. C. Y., et al. “Pea Protein Isolates: Structure, Extraction, and Functionality”. *Food Reviews International*, vol. 34, nº 2, fevereiro de 2018, p. 126–47. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1242135>.

Lavelli, Vera, e Jolanta Sereikaitė. “Kinetic Study of Encapsulated β -Carotene Degradation in Dried Systems: A Review”. *Foods*, vol. 11, nº 3, fevereiro de 2022, p. 437. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods11030437>.

Le Goff, Manon, et al. “Microalgal Carotenoids and Phytosterols Regulate Biochemical

- Mechanisms Involved in Human Health and Disease Prevention”. *Biochimie*, vol. 167, dezembro de 2019, p. 106–18. *DOI.org*(*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2019.09.012>.
- Lee, Seonmin, et al. “Tracking Bioactive Peptides and Their Origin Proteins during the in Vitro Digestion of Meat and Meat Products”. *Food Chemistry*, vol. 454, outubro de 2024, p. 139845. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139845>.
- Lee, Seung-Joo, et al. “Identification of Volatile Components in Basil (*Ocimum Basilicum* L.) and Thyme Leaves (*Thymus Vulgaris* L.) and Their Antioxidant Properties”. *Food Chemistry*, vol. 91, nº 1, junho de 2005, p. 131–37. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.056>.
- Legros, Julie, et al. “The Role of Ovotransferrin in Egg-White Antimicrobial Activity: A Review”. *Foods*, vol. 10, nº 4, abril de 2021, p. 823. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.3390/foods10040823>.
- Li, Minghui, et al. “Recent Progress on Protein-Polyphenol Complexes: Effect on Stability and Nutrients Delivery of Oil-in-Water Emulsion System”. *Frontiers in Nutrition*, vol. 8, novembro de 2021, p. 765589. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.765589>.
- Liang, Luodan, et al. “Fabrication and Characterisation of Pea Protein Isolate-chlorogenic Acid Nanoparticles”. *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 59, nº 3, março de 2024, p. 1615–23. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1111/ijfs.16911>.
- Liao, Lan, et al. “Preparation and Characterization of Succinic Acid Deamidated Wheat Gluten Microspheres for Encapsulation of Fish Oil”. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 92, abril de 2012, p. 305–14. *DOI.org* (*Crossref*),

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.12.003>.

Liao, Wang, et al. “Egg Protein-Derived Bioactive Peptides: Preparation, Efficacy, and Absorption”. *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 85, Elsevier, 2018, p. 1–58. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.02.001>.

Liu, Chengzhen, et al. “Fabrication and Characterization of β -Lactoglobulin-Based Nanocomplexes Composed of Chitosan Oligosaccharides as Vehicles for Delivery of Astaxanthin”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 66, n° 26, julho de 2018, p. 6717–26. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00834>.

Liu, Jingwen, et al. “Binding Behaviors and Structural Characteristics of Ternary Complexes of β -Lactoglobulin, Curcumin, and Fatty Acids”. *RSC Adv.*, vol. 7, n° 73, 2017, p. 45960–67. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1039/C7RA09012A>.

Liu, Shing-Hwa, et al. “Synergistic Effects of Chitosan and Fish Oil on Lipid Metabolism in Rats Fed a High-Fat and Low-Carbohydrate Diet”. *Nutrients*, vol. 16, n° 23, novembro de 2024, p. 4080. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/nu16234080>.

Ma, Wenshu, et al. “Research Progress in Lipid Metabolic Regulation of Bioactive Peptides”. *Food Production, Processing and Nutrition*, vol. 5, n° 1, fevereiro de 2023, p. 10. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00123-y>.

Malik, Darshan, et al. “Water-Soluble Vitamins”. *Textbook of Nutritional Biochemistry*, por Darshan Malik et al., Springer Nature Singapore, 2023, p. 291–389. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-981-19-4150-4_10.

Manach, Claudine, et al. “Bioavailability and Bioefficacy of Polyphenols in Humans. I. Review of 97 Bioavailability Studies”. *The American Journal of Clinical Nutrition*,

vol. 81, nº 1, janeiro de 2005, p. 230S-242S. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.230S>.

Martín, María José, et al. “Microencapsulation of Bacteria: A Review of Different Technologies and Their Impact on the Probiotic Effects”. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 27, fevereiro de 2015, p. 15–25. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.09.010>.

Martins, Evandro, et al. “Oil Encapsulation Techniques Using Alginate as Encapsulating Agent: Applications and Drawbacks”. *Journal of Microencapsulation*, vol. 34, nº 8, novembro de 2017, p. 754–71. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/02652048.2017.1403495>.

Martos, Gustavo, et al. “Mechanisms Underlying Differential Food Allergy Response to Heated Egg”. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 127, nº 4, abril de 2011, p. 990-997.e2. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2011.01.057>.

McClements, D. J., et al. “Emulsion-Based Delivery Systems for Lipophilic Bioactive Components”. *Journal of Food Science*, vol. 72, nº 8, outubro de 2007. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00507.x>.

McClements, David Julian. “Encapsulation, Protection, and Release of Hydrophilic Active Components: Potential and Limitations of Colloidal Delivery Systems”. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 219, maio de 2015, p. 27–53. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.02.002>.

McLauchlan, Jennifer, et al. “Oat Protein: Review of Structure-Function Synergies with Other Plant Proteins”. *Food Hydrocolloids*, vol. 154, setembro de 2024, p. 110139. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110139>.

- Mohammadian, Mehdi, et al. “Nanostructured Food Proteins as Efficient Systems for the Encapsulation of Bioactive Compounds”. *Food Science and Human Wellness*, vol. 9, n° 3, setembro de 2020, p. 199–213. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2020.04.009>.
- Mohanty, D. P., et al. “Milk Derived Bioactive Peptides and Their Impact on Human Health – A Review”. *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 23, n° 5, setembro de 2016, p. 577–83. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.06.005>.
- Mondal, Satyajit, et al. “Stability of Curcumin in Different Solvent and Solution Media: UV– Visible and Steady-State Fluorescence Spectral Study”. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 158, maio de 2016, p. 212–18. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.03.004>.
- Mordi, Raphael C., et al. “Free Radical Mediated Oxidative Degradation of Carotenes and Xanthophylls”. *Molecules*, vol. 25, n° 5, fevereiro de 2020, p. 1038. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules25051038>.
- Mousavi Khaneghah, Amin, et al. “Water-Soluble Vitamins”. *Innovative Thermal and Non-Thermal Processing, Bioaccessibility and Bioavailability of Nutrients and Bioactive Compounds*, Elsevier, 2019, p. 241–66. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00008-1>.
- Muhoza, Bertrand, et al. “Spray-and Freeze-Drying of Microcapsules Prepared by Complex Coacervation Method: A Review”. *Food Hydrocolloids*, vol. 140, julho de 2023, p. 108650. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108650>.
- Ngamwonglumlert, Luxsika, et al. “Natural Colorants: Pigment Stability and Extraction Yield Enhancement via Utilization of Appropriate Pretreatment and Extraction Methods”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 57, n° 15, outubro de

- 2017, p. 3243–59. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1109498>.
- Niness, Kathy R. “Inulin and Oligofructose: What Are They?” *The Journal of Nutrition*, vol. 129, nº 7, julho de 1999, p. 1402S-1406S. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1093/jn/129.7.1402S>.
- Niño-Medina, Guillermo, et al. “Feruloylated Arabinoxylans and Arabinoxylan Gels: Structure, Sources and Applications”. *Phytochemistry Reviews*, vol. 9, nº 1, março de 2010, p. 111–20. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9147-3>.
- Njus, David, et al. “Ascorbic Acid: The Chemistry Underlying Its Antioxidant Properties”. *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 159, novembro de 2020, p. 37–43. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.07.013>.
- . “Ascorbic Acid: The Chemistry Underlying Its Antioxidant Properties”. *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 159, novembro de 2020, p. 37–43. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.07.013>.
- Nurliyani, et al. “Characteristics of protein and amino acid in various poultry egg white ovomucoid”. *Food Science and Technology*, vol. 43, 2023, p. e101722. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1590/fst.101722>.
- Oteng-Pabi, Samuel K., et al. “Site-Specific Protein Labelling and Immobilization Mediated by Microbial Transglutaminase”. *Chem. Commun.*, vol. 50, nº 50, 2014, p. 6604–06. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1039/C4CC00994K>.
- Pan, Kang, et al. “Enhanced Dispersibility and Bioactivity of Curcumin by Encapsulation in Casein Nanocapsules”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 61, nº 25, junho de 2013, p. 6036–43. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1021/jf400752a>.
- Panith, Nootchanartch, et al. “Effect of Physical and Physicochemical Characteristics of

- Chitosan on Fat-Binding Capacities under in Vitro Gastrointestinal Conditions”. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 71, setembro de 2016, p. 25–32. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.03.013>.
- Patel, Sita Sharan, et al. “Cellular and Molecular Mechanisms of Curcumin in Prevention and Treatment of Disease”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 60, nº 6, março de 2020, p. 887–939. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1552244>.
- Pattni, Bhushan S., et al. “New Developments in Liposomal Drug Delivery”. *Chemical Reviews*, vol. 115, no 19, outubro de 2015, p. 10938–66. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00046>.
- Pei, Jingyan, et al. “Advances in the Stability Challenges of Bioactive Peptides and Improvement Strategies”. *Current Research in Food Science*, vol. 5, 2022, p. 2162–70. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.10.031>.
- Peñalva, Rebeca, et al. “Increased Oral Bioavailability of Resveratrol by Its Encapsulation in Casein Nanoparticles”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 19, nº 9, setembro de 2018, p. 2816. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/ijms19092816>.
- Pereira Souza, Ana Cardinale, et al. “Maltodextrin, Pectin and Soy Protein Isolate as Carrier Agents in the Encapsulation of Anthocyanins-Rich Extract from Jaboticaba Pomace”. *Food and Bioproducts Processing*, vol. 102, março de 2017, p. 186–94. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.12.012>.
- Permyakov, Eugene A., e Lawrence J. Berliner. “ α -Lactalbumin: Structure and Function”. *FEBS Letters*, vol. 473, nº 3, maio de 2000, p. 269–74. *DOI.org (Crossref)*, [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(00\)01546-5](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(00)01546-5).
- Perpetuini, Giorgia, et al. “Table Olives More than a Fermented Food”. *Foods*, vol. 9, nº 2,

fevereiro de 2020, p. 178. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods9020178>.

Perrechil, Fabiana, et al. “Evaluation of Modified Starch and Rice Protein Concentrate as Wall Materials on the Microencapsulation of Flaxseed Oil by Freeze-Drying”. *LWT*, vol. 140, abril de 2021, p. 110760. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110760>.

Phull, Abdul Rehman, e Song Ja Kim. “Fucoidan as Bio-Functional Molecule: Insights into the Anti-Inflammatory Potential and Associated Molecular Mechanisms”. *Journal of Functional Foods*, vol. 38, novembro de 2017, p. 415–26. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.051>.

Pogorzelska-Nowicka, Ewelina, et al. “Bioactive Compounds in Functional Meat Products”. *Molecules*, vol. 23, nº 2, janeiro de 2018, p. 307. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules23020307>.

Poore, J., e T. Nemecek. “Reducing Food’s Environmental Impacts through Producers and Consumers”. *Science*, vol. 360, nº 6392, junho de 2018, p. 987–92. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>.

Punnya E. P. *, Ranitha R. Nanoemulsion: An Emerging Approach For The Enhancement Of Solubility In Lipophilic Drugs. março de 2024. *DOI.org (Datacite)*, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10777516>.

Pushpanathan, Muthurulan, et al. “Antimicrobial Peptides: Versatile Biological Properties”. *International Journal of Peptides*, vol. 2013, junho de 2013, p. 1–15. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1155/2013/675391>.

Quintero Quiroz, Julián, et al. “Use of Plant Proteins as Microencapsulating Agents of Bioactive Compounds Extracted from Annatto Seeds (*Bixa Orellana* L.)”.

Antioxidants, vol. 9, no 4, abril de 2020, p. 310. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/antiox9040310>.

Rahman Mazumder, Md. Anisur, e Thottiam Vasudevan Ranganathan. “Encapsulation of Isoflavone with Milk, Maltodextrin and Gum Acacia Improves Its Stability”. *Current Research in Food Science*, vol. 2, junho de 2020, p. 77–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2019.12.003>.

Rautiainen, Susanne, et al. “Dietary Supplements and Disease Prevention — a Global Overview”. *Nature Reviews Endocrinology*, vol. 12, nº 7, julho de 2016, p. 407–20. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1038/nrendo.2016.54>.

Ray, Sohini, et al. “An Overview of Encapsulation of Active Compounds Used in Food Products by Drying Technology”. *Food Bioscience*, vol. 13, março de 2016, p. 76–83. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.12.009>.

Razi, Saeed Mirarab, et al. “An Overview of the Functional Properties of Egg White Proteins and Their Application in the Food Industry”. *Food Hydrocolloids*, vol. 135, fevereiro de 2023, p. 108183. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108183>.

Řepka, David, et al. “Application of Physical-Chemical Approaches for Encapsulation of Active Substances in Pharmaceutical and Food Industries”. *Foods*, vol. 12, no 11, maio de 2023, p. 2189. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/foods12112189>.

Rezaei, Atefe, et al. “Nanoencapsulation of Hydrophobic and Low-Soluble Food Bioactive Compounds within Different Nanocarriers”. *Food Hydrocolloids*, vol. 88, março de 2019, p. 146–62. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.003>.

Rezagholizade-shirvan, Alieh, et al. “Bioactive Compound Encapsulation: Characteristics,

Applications in Food Systems, and Implications for Human Health”. *Food Chemistry: X*, vol. 24, dezembro de 2024, p. 101953. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101953>.

Ribeiro, Daniela O., et al. “Chemical Stability Study of Vitamins Thiamine, Riboflavin, Pyridoxine and Ascorbic Acid in Parenteral Nutrition for Neonatal Use”. *Nutrition Journal*, vol. 10, nº 1, dezembro de 2011, p. 47. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1186/1475-2891-10-47>.

Ricardo, Fabián, et al. “A Multi-Scale Approach to Microencapsulation by Interfacial Polymerization”. *Polymers*, vol. 13, no 4, fevereiro de 2021, p. 644. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/polym13040644>.

Rosenberg, Moshe, et al. “Microencapsulation of a Model Oil in Wall System Consisting of Wheat Proteins Isolate (WHPI) and Lactose”. *Applied Sciences*, vol. 8, no 10, outubro de 2018, p. 1944. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/app8101944>.

Ruiz-Rodriguez, Alejandro, et al. “Recent Trends in the Advanced Analysis of Bioactive Fatty Acids”. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, vol. 51, nº 2, janeiro de 2010, p. 305–26. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2009.05.012>.

Sadiq, Uzma, et al. “Casein Micelles as an Emerging Delivery System for Bioactive Food Components”. *Foods*, vol. 10, nº 8, agosto de 2021, p. 1965. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/foods10081965>.

---. “Casein Micelles as an Emerging Delivery System for Bioactive Food Components”. *Foods*, vol. 10, nº 8, agosto de 2021, p. 1965. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/foods10081965>.

Saghaei, Robabeh, et al. “Development of Electrospun Whey Protein Isolate Nanofiber

- Mat for Omega-3 Nanoencapsulation: Microstructural and Physical Property Analysis”. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 301, abril de 2025, p. 140273. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140273>.
- Saini, Ramesh Kumar, et al. “Carotenoids: Dietary Sources, Extraction, Encapsulation, Bioavailability, and Health Benefits—A Review of Recent Advancements”. *Antioxidants*, vol. 11, nº 4, abril de 2022, p. 795. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/antiox11040795>.
- Samanta, Saptadip. “Fat-Soluble Vitamins”. *Nutrition and Functional Foods in Boosting Digestion, Metabolism and Immune Health*, Elsevier, 2022, p. 329–64. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821232-5.00011-2>.
- Santos, Rafaella Santos Dos, et al. “Análise das concentrações de cafeína em suplementos alimentares”. *Research, Society and Development*, vol. 12, nº 11, outubro de 2023, p. e53121143707. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i11.43707>.
- Santos-Buelga, Celestino, e Arturo San Feliciano. “Flavonoids: From Structure to Health Issues”. *Molecules*, vol. 22, nº 3, março de 2017, p. 477. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules22030477>.
- Sarabia-Vallejo, Álvaro, et al. “Cyclodextrin Inclusion Complexes for Improved Drug Bioavailability and Activity: Synthetic and Analytical Aspects”. *Pharmaceutics*, vol. 15, no 9, setembro de 2023, p. 2345. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15092345>.
- Savadkoohi, Sobhan, et al. “Structural Properties of Condensed Ovalbumin Systems Following Application of High Pressure”. *Food Hydrocolloids*, vol. 53, fevereiro de 2016, p. 104–14. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.09.021>.
- Senaka Ranadheera, C., et al. “Probiotic Viability and Physico-Chemical and Sensory

Properties of Plain and Stirred Fruit Yogurts Made from Goat's Milk". *Food Chemistry*, vol. 135, nº 3, dezembro de 2012, p. 1411–18. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.025>.

Sengupta, Ranjita, et al. "The Role of Cell Surface Architecture of Lactobacilli in Host-Microbe Interactions in the Gastrointestinal Tract". *Mediators of Inflammation*, vol. 2013, 2013, p. 1–16. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1155/2013/237921>.

Shah, Bakht Ramin. "Stability and Release Behavior of Bioactive Compounds (with Antioxidant Activity) Encapsulated by Pickering Emulsion". *Emulsion-based Encapsulation of Antioxidants*, organizado por M. Ali Aboudzadeh, Springer International Publishing, 2020, p. 287–309. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-3-030-62052-3_8.

Shahidi, Fereidoon, e Chandrika Sewwandi Dissanayaka. "Phenolic-Protein Interactions: Insight from in-Silico Analyses – a Review". *Food Production, Processing and Nutrition*, vol. 5, nº 1, janeiro de 2023, p. 2. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00121-0>.

Shang, Haijun, et al. "Study on the Effect of Quinoa Saponins on Human Colon Cancer HT - 29 Cells". *Food Science & Nutrition*, vol. 13, nº 1, janeiro de 2025, p. e4669. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1002/fsn3.4669>.

Sharif, Hafiz Rizwan, et al. "Current Progress in the Utilization of Native and Modified Legume Proteins as Emulsifiers and Encapsulants – A Review". *Food Hydrocolloids*, vol. 76, março de 2018, p. 2–16. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.01.002>.

Sharma, Kartik, et al. "Saponins: A Concise Review on Food Related Aspects,

- Applications and Health Implications”. *Food Chemistry Advances*, vol. 2, outubro de 2023, p. 100191. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100191>.
- Sharma, Neha, e Ashish M. Mohite. “Meat Products with Encapsulated Bioactive Ingredients”. *Healthier Meat Products*, organizado por Ashok Kumar Pathera et al., Springer Nature Switzerland, 2025, p. 267–90. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-3-031-78215-2_13.
- Shen, Lihong, et al. “Potential Immunoregulatory Mechanism of Plant Saponins: A Review”. *Molecules*, vol. 29, nº 1, dezembro de 2023, p. 113. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules29010113>.
- Shen, Nan, et al. “Plant Flavonoids: Classification, Distribution, Biosynthesis, and Antioxidant Activity”. *Food Chemistry*, vol. 383, julho de 2022, p. 132531. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>.
- Shen, ShiChun, et al. “Omega-3 Fatty Acid Supplementation and Coronary Heart Disease Risks: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Clinical Trials”. *Frontiers in Nutrition*, vol. 9, fevereiro de 2022, p. 809311. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.809311>.
- Sheraz, Muhammad Ali, et al. “Photo, Thermal and Chemical Degradation of Riboflavin”. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, vol. 10, agosto de 2014, p. 1999–2012. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3762/bjoc.10.208>.
- Pande, Shantanu. “Liposomes for Drug Delivery: Review of Vesicular Composition, Factors Affecting Drug Release and Drug Loading in Liposomes”. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, vol. 51, no 1, dezembro de 2023, p. 428–40. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/21691401.2023.2247036>.
- Shori, Amal Bakr. “Microencapsulation Improved Probiotics Survival During Gastric

Transit”. *HAYATI Journal of Biosciences*, vol. 24, nº 1, janeiro de 2017, p. 1–5.

DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.hjb.2016.12.008>.

Shoulders, Matthew D., e Ronald T. Raines. “Collagen Structure and Stability”. *Annual Review of Biochemistry*, vol. 78, nº 1, junho de 2009, p. 929–58. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.77.032207.120833>.

Sidhu, G. S., e D. G. Oakenfull. “A Mechanism for the Hypocholesterolaemic Activity of Saponins”. *British Journal of Nutrition*, vol. 55, nº 3, maio de 1986, p. 643–49. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1079/BJN19860070>.

Sigurdson, Gregory T., et al. “Natural Colorants: Food Colorants from Natural Sources”.

Annual Review of Food Science and Technology, vol. 8, nº 1, fevereiro de 2017, p. 261–

80. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923>.

Sing, Charles E., e Sarah L. Perry. “Recent Progress in the Science of Complex Coacervation”. *Soft Matter*, vol. 16, no 12, 2020, p. 2885–914. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1039/D0SM00001A>.

Singh, Balwinder, et al. “Saponins in Pulses and Their Health Promoting Activities: A Review”. *Food Chemistry*, vol. 233, outubro de 2017, p. 540–49. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.161>.

Sîrbe, Claudia, et al. “An Update on the Effects of Vitamin D on the Immune System and Autoimmune Diseases”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, nº 17, agosto de 2022, p. 9784. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/ijms23179784>.

Somchue, W., et al. “Encapsulation of α -Tocopherol in Protein-Based Delivery Particles”. *Food Research International*, vol. 42, nº 8, outubro de 2009, p. 909–14. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.04.021>.

- Song, Yongyang, et al. “Recent Progress in Interfacial Polymerization”. *Materials Chemistry Frontiers*, vol. 1, no 6, 2017, p. 1028–40. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1039/C6QM00325G>.
- Sorrenti, Valeria, et al. “Recent Advances in Health Benefits of Bioactive Compounds from Food Wastes and By-Products: Biochemical Aspects”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, n° 3, janeiro de 2023, p. 2019. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/ijms24032019>.
- Southon, S., et al. “The Effect of Saponins on Mineral Availability”. *Trace Elements in Man and Animals 6*, organizado por Lucille S. Hurley et al., Springer US, 1988, p. 413–15. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0723-5_141.
- Srivastava, Shivangi, et al. “Effect of Microencapsulation Techniques on the Different Properties of Bioactives, Vitamins and Minerals”. *Food Science and Biotechnology*, vol. 33, no 14, novembro de 2024, p. 3181–98. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01666-1>.
- Surampudi, Prasanth, et al. “Lipid Lowering with Soluble Dietary Fiber”. *Current Atherosclerosis Reports*, vol. 18, n° 12, dezembro de 2016, p. 75. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s11883-016-0624-z>.
- Tanzadehpanah, Hamid, et al. “Bioactive and ACE Binding Properties of Three Synthetic Peptides Assessed by Various Spectroscopy Techniques”. *Process Biochemistry*, vol. 51, n° 12, dezembro de 2016, p. 2067–75. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.09.017>.
- Tarade, Kavita M., et al. “Kinetics of Degradation of Saponins in Soybean Flour (Glycine Max.) during Food Processing”. *Journal of Food Engineering*, vol. 76, n° 3, outubro de 2006, p. 440–45. DOI.org (Crossref),

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.044>.

Telegina, T. A., et al. “Isomerization of Carotenoids in Photosynthesis and Metabolic Adaptation”. *Biophysical Reviews*, vol. 15, nº 5, outubro de 2023, p. 887–906.

DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01156-4>.

Temiz, Ayhan, e Dilay K. Ayhan. “Enzymes in Minimally Processed Fruits and Vegetables”. *Minimally Processed Refrigerated Fruits and Vegetables*, organizado por Fatih Yildiz e Robert C. Wiley, Springer US, 2017, p. 93–151. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6_4.

Terao, Junji. “Revisiting Carotenoids as Dietary Antioxidants for Human Health and Disease Prevention”. *Food & Function*, vol. 14, nº 17, 2023, p. 7799–824. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1039/D3FO02330C>.

Timilsena, Yakindra Prasad, et al. “Perspectives on Saponins: Food Functionality and Applications”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, nº 17, agosto de 2023, p. 13538. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/ijms241713538>.

Tripathi, M. K., e S. K. Giri. “Probiotic Functional Foods: Survival of Probiotics during Processing and Storage”. *Journal of Functional Foods*, vol. 9, julho de 2014, p. 225–41. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.04.030>.

Tumbas Šaponjac, Vesna, et al. “Encapsulation of sour cherry pomace extract by freeze drying: characterization and storage stability”. *Acta Chimica Slovenica*, vol. 64, nº 2, junho de 2017, p. 283–89. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.17344/acsi.2016.2789>.

Tyagi, Poonam, et al. “Bactericidal Activity of Curcumin I Is Associated with Damaging of Bacterial Membrane”. *PLOS ONE*, organizado por Dongsheng Zhou, vol. 10, nº 3, março de 2015, p. e0121313. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121313>.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121313>.

Uddike, Ashley A., e Steven J. Schwartz. “Thermal Processing of Vegetables Increases Cis Isomers of Lutein and Zeaxanthin”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 51, nº 21, outubro de 2003, p. 6184–90. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1021/jf030350f>

Uppal, Shivani, et al. “Inclusion Complexation and Coacervation to Fabricate Nanoencapsulated Foods”. *Nano-Food Engineering*, organizado por Umesh Hebbar et al., Springer International Publishing, 2020, p. 97–123. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1007/978-3-030-44552-2_4.

Uversky, Vladimir N., et al. “Why Are ?Natively Unfolded? Proteins Unstructured under Physiologic Conditions?” *Proteins: Structure, Function, and Genetics*, vol. 41, nº 3, novembro de 2000, p. 415–27. *DOI.org (Crossref)*, [https://doi.org/10.1002/1097-0134\(20001115\)41:3<415::AID-PROT130>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1097-0134(20001115)41:3<415::AID-PROT130>3.0.CO;2-7).

Van De Langerijt, Tessa M., et al. “Structural, Binding and Functional Properties of Milk Protein-Polyphenol Systems: A Review”. *Molecules*, vol. 28, nº 5, março de 2023, p. 2288. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules28052288>.

Vanden Braber, N. L., et al. “Effect of Microencapsulation in Whey Protein and Water-Soluble Chitosan Derivative on the Viability of the Probiotic *Kluyveromyces Marxianus* VM004 during Storage and in Simulated Gastrointestinal Conditions”. *LWT*, vol. 118, janeiro de 2020, p. 108844. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108844>.

Vanin, Fernanda Maria, et al. “Bioactive Ingredients for Safe and Health-Promoting Functional Foods”. *Foods*, vol. 12, nº 22, novembro de 2023, p. 4134. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods12224134>.

- Vulić, Jelena, et al. “Bioavailability and Bioactivity of Encapsulated Phenolics and Carotenoids Isolated from Red Pepper Waste”. *Molecules*, vol. 24, n° 15, agosto de 2019, p. 2837. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules24152837>.
- Vuorio, Alpo, e Petri T. Kovanen. “Decreasing the Cholesterol Burden in Heterozygous Familial Hypercholesterolemia Children by Dietary Plant Stanol Esters”. *Nutrients*, vol. 10, n° 12, dezembro de 2018, p. 1842. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/nu10121842>.
- Walter, Michael H., e Dieter Strack. “Carotenoids and Their Cleavage Products: Biosynthesis and Functions”. *Natural Product Reports*, vol. 28, n° 4, 2011, p. 663. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1039/c0np00036a>.
- Wan, Zhi-Li, et al. “Plant Protein-Based Delivery Systems for Bioactive Ingredients in Foods”. *Food & Function*, vol. 6, n° 9, 2015, p. 2876–89. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1039/C5FO00050E>.
- Wang, Jianming, et al. “Effect of pH on the Formation Mechanisms, Emulsifying Properties and Curcumin Encapsulation of Oat Protein Isolate–High Methoxy Pectin Complexes”. *Food Hydrocolloids*, vol. 149, abril de 2024, p. 109454. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109454>.
- Wang, Lei, e Yue Zhang. “Heat-Induced Self-Assembly of Zein Nanoparticles: Fabrication, Stabilization and Potential Application as Oral Drug Delivery”. *Food Hydrocolloids*, vol. 90, maio de 2019, p. 403–12. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.12.040>.
- Wang, Luping, et al. “Curcumin-Loaded Microcapsules with Soy and Whey Protein as Wall Material: In Vitro Release, and Ex Vivo Absorption Based on the Rat Small Intestine”. *Journal of Food Engineering*, vol. 383, dezembro de 2024, p. 112254.

DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112254>.

Wang, Yuying, et al. “Structural Interplay between Curcumin and Soy Protein to Improve the Water-Solubility and Stability of Curcumin”. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 193, dezembro de 2021, p. 1471–80. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.210>.

Wang, Zichao, et al. “Effect of Monosaccharide Composition and Proportion on the Bioactivity of Polysaccharides: A Review”. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 254, janeiro de 2024, p. 127955. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127955>.

Wilson, W. William, et al. “Status of Methods for Assessing Bacterial Cell Surface Charge Properties Based on Zeta Potential Measurements”. *Journal of Microbiological Methods*, vol. 43, nº 3, janeiro de 2001, p. 153–64. *DOI.org (Crossref)*, [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00224-4).

Wu, Yuhang, et al. “Quantitative Changes and Transformation Mechanisms of Saponin Components in Chinese Herbal Medicines during Storage and Processing: A Review”. *Molecules*, vol. 29, nº 18, setembro de 2024, p. 4486. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules29184486>.

Xavier, Janifer Raj, et al. “Bioactive Compounds of Foods: Phytochemicals and Peptides”. *Food and Humanity*, vol. 3, dezembro de 2024, p. 100354. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100354>.

Xi, Lai, et al. “The Effect of the Molecular Weight of Blackberry Polysaccharides on Gut Microbiota Modulation and Hypoglycemic Effect *in Vivo*”. *Food & Function*, vol. 15, nº 16, 2024, p. 8586–603. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1039/D4FO01989J>.

Xiao, Jianbo. “Recent Advances on the Stability of Dietary Polyphenols”. *eFood*, vol. 3, nº

3, junho de 2022, p. e21. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1002/efd2.21>.

Xie, Siyu, et al. “Graduate Student Literature Review: Potential Uses of Milk Proteins as Encapsulation Walls for Bioactive Compounds”. *Journal of Dairy Science*, vol. 105, n° 10, outubro de 2022, p. 7959–71. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21127>.

Xiong, Youling L. “Myofibrillar Protein from Different Muscle Fiber Types: Implications of Biochemical and Functional Properties in Meat Processing*”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 34, n° 3, janeiro de 1994, p. 293–320. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/10408399409527665>.

Yang, Zhen, et al. “Structural Characteristics, Techno-Functionalities, Innovation Applications and Future Prospects of Soybean β -Conglycinin/Glycinin: A Comprehensive Review”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, dezembro de 2024, p. 1–18. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2440601>.

Ye, Qianyu, et al. “On Improving Bioaccessibility and Targeted Release of Curcumin-Whey Protein Complex Microparticles in Food”. *Food Chemistry*, vol. 346, junho de 2021, p. 128900. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128900>.

Yuan, Dan, et al. “Self-Assembled Soy Protein Nanoparticles by Partial Enzymatic Hydrolysis for pH-Driven Encapsulation and Delivery of Hydrophobic Cargo Curcumin”. *Food Hydrocolloids*, vol. 120, novembro de 2021, p. 106759. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106759>.

Yuan, Qin, et al. “Glycosidic Linkages of Fungus Polysaccharides Influence the Anti-Inflammatory Activity in Mice”. *Journal of Advanced Research*, vol. 67, janeiro de

2025, p. 161–72. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.01.037>.

Zabot, Giovani Leone, et al. “Encapsulation of Bioactive Compounds for Food and Agricultural Applications”. *Polymers*, vol. 14, n° 19, outubro de 2022, p. 4194. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/polym14194194>.

Zhang, Hao, et al. “Interaction of Milk Whey Protein with Common Phenolic Acids”. *Journal of Molecular Structure*, vol. 1058, janeiro de 2014, p. 228–33. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.11.009>.

Zhang, Haolin, et al. “Stability of Polyphenols in Food Processing”. *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 102, Elsevier, 2022, p. 1–45. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.04.006>.

Zhang, Wenxue, Isaac Duah Boateng, et al. “Proteins from Legumes, Cereals, and Pseudo-Cereals: Composition, Modification, Bioactivities, and Applications”. *Foods*, vol. 13, n° 13, junho de 2024, p. 1974. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods13131974>.

Zhang, Xiaohan, Zhao Huang, et al. “Effect of Ultrasound and Alkali-Heat Treatment on the Thermal Gel Properties and Catechin Encapsulation Capacity of Ovalbumin”. *Food Hydrocolloids*, vol. 145, dezembro de 2023, p. 109069. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109069>.

Zhang, Xinyu, Zhe Liu, et al. “Interfacial and Foaming Properties of Plant and Microbial Proteins: Comparison of Structure-Function Behavior of Different Proteins”. *Food Chemistry*, vol. 463, janeiro de 2025, p. 141431. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141431>.

Zhang, Yue, Yunsu Guo, et al. “Recent Development of Egg Protein Fractions and Individual Proteins as Encapsulant Materials for Delivery of Bioactives”. *Food*

Chemistry, vol. 403, março de 2023, p. 134353.
DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134353>.

Zhong, Xuemei, et al. “Immunomodulatory Effect and Biological Significance of β -Glucans”. *Pharmaceutics*, vol. 15, nº 6, maio de 2023, p. 1615. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15061615>.

Zhu, Xiangwei, et al. “Improved Foaming Properties and Interfacial Observation of Sodium Caseinate-Based Complexes: Effect of Carboxymethyl Cellulose”. *Food Hydrocolloids*, vol. 105, agosto de 2020, p. 105758. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105758>.

Zhuang, Yuan, et al. “Impact of Heating Temperature and Fatty Acid Type on the Formation of Lipid Oxidation Products During Thermal Processing”. *Frontiers in Nutrition*, vol. 9, junho de 2022, p. 913297. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.913297>.

CAPÍTULO 3 - ARTIGO EXPERIMENTAL

**Microencapsulamento de extrato de casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*)
com proteínas do soro, ervilha e soja: avaliação da estabilidade, morfologia
e bioacessibilidade**

Resumo

A jabuticaba (*Plinia cauliflora*) é uma fruta brasileira rica em antocianinas, compostos bioativos altamente antioxidantes, porém sensíveis às condições do trato gastrointestinal. Este estudo teve como objetivo avaliar a estabilidade e a bioacessibilidade de antocianinas de extrato de casca de jabuticaba microencapsuladas por spray dryer, utilizando diferentes matrizes proteicas: 100% proteína do soro do leite isolada (WPI), 75% WPI + 25% proteína de soja e 75% WPI + 25% proteína de ervilha. As microcápsulas foram caracterizadas quanto a colorimetria, teor de antocianinas, compostos fenólicos totais, capacidade antioxidante (ABTS e FRAP), tamanho de partícula, potencial zeta, eficiência de encapsulamento, morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e interações químicas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). As amostras foram ainda submetidas à digestão gastrointestinal simulada, sendo os sobrenadantes analisados quanto à colorimetria (sistema CIELAB) e teor de antocianinas para o cálculo da bioacessibilidade. As partículas apresentaram tamanho médio abaixo de 1150 d.nm, com potenciais zeta indicativos de estabilidade coloidal. A eficiência de encapsulamento variou entre as formulações, com destaque para as que continham proteínas vegetais. As imagens de MEV revelaram superfícies esféricas e contínuas, enquanto o FTIR indicou interações entre proteínas e compostos fenólicos. Durante a digestão, observou-se redução da intensidade de cor e do teor de antocianinas, especialmente na fase intestinal. A formulação com proteína do soro de leite e proteína de ervilha apresentou maior teor residual de antocianinas ($1,11 \pm 0,01$ mg/g) e bioacessibilidade de 8,00%, significativamente superior ao extrato livre ($p < 0,05$). Os resultados evidenciam o papel das proteínas vegetais na proteção e liberação dirigida de antocianinas, com potencial aplicação em formulações funcionais.

Palavras-chave: Spray drying; Proteínas vegetais; Sistema CIELAB; Potencial Zeta; Tamanho de partícula; FTIR; Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Introdução

A jabuticaba (*Plinia cauliflora*) é uma fruta brasileira de coloração escura, contendo principalmente na casca compostos bioativos, tendo destaque para o teor de 732,77 mg de antocianinas/100 g de casca de jabuticaba, para o teor de compostos fenólicos 12,20 equivalente de Ácido Gálico mg/g de casca da jabuticaba, e também para a presença de 311 g de ácido elágico para cada 100 g de fruta fresca (Leite-Legatti et al., 2012; Paludo, 2013; Resende et al., 2020; Abe et al., 2012). Por causa da composição e sabor, a jabuticaba foi eleita como a segunda melhor fruta do mundo pela TasteAtlas, sendo uma fruta de consumo in natura, porém a casca geralmente não é consumida, por fatores como a rigidez e o sabor adstringente, já na fabricação de produtos a partir da jabuticaba a casca é considerada como um grande volume de resíduos (Albuquerque et al., 2020).

Em virtude de sua estrutura química as antocianinas são compostos sensíveis a diversos fatores, tais como o pH, a temperatura, o oxigênio e a luz. As antocianinas quando em solução aquosa, reagem a mudanças no pH, isso ocorre pela presença da estrutura ressonante do íon flavílio que passa pela transição de elétrons, sendo essa estrutura também responsável pela propriedade redox. Deste modo a maior estabilidade das antocianinas ocorre em pH abaixo de 3, no qual a estrutura se apresenta com cátions flavílicos, já em pH maior que 4 as antocianinas apresentam as formas de carbinol e chalcona (Smeriglio et al., 2016). Em temperaturas acima de 60°C ocorre a hidrólise da ligação 3-glicosídica, que libera a aglicona, abertura hidrolítica do anel, assim formando derivado da chalcona, que resulta em coloração castanho-escuro (Araújo, 2019; Stringheta e Freitas, 2021). A presença de oxigênio pode degradar as antocianinas de maneira direta ou indireta por meio de enzimas oxidativas, isso ocorre devido a presença de insaturações na estrutura das antocianinas, que são suscetíveis ao oxigênio molecular (Cavalcanti et al., 2011). A luz, principalmente combinada com o oxigênio, acelera a degradação das antocianinas (Rigolon et al., 2021; Stringheta e Freitas, 2021).

Em virtude disto, a extração e o encapsulamento das antocianinas presentes na casca da jabuticaba pode ser o ponto de partida para o reaproveitamento desses subprodutos para o consumo humano, valorização da agroindústria, criação de novos ingredientes e formulação de alimentos funcionais (Baldin, 2016). De acordo com a análise de mercado fornecida pela Grand View Research (2024), o mercado global de alimentos funcionais foi estimado em 280,7 bilhões de dólares em 2021, com projeção de crescimento da taxa composta anual de

8,5% entre 2022 e 2030.

Como alternativa a sensibilidade da jabuticaba e demanda mercadológica o microencapsulamento de compostos bioativos da jabuticaba é uma alternativa que vem sendo abordada em pesquisas (Rocha et al., 2019; Mohammadalinejad e Kurek, 2021; Feitosa et al., 2023). O microencapsulamento refere-se a um conjunto de técnicas que promovem a cobertura ou adsorção de um ativo (composto de interesse) em uma matriz inerte (material encapsulante ou de parede) com a finalidade de protegê-lo contra condições ambientais adversas (Ozkan et al., 2019). Em estudo realizado por Paes (2021), o microencapsulamento do extrato de antocianinas do jamelão com maltodextrina, concluiu que após o ensaio de digestão simulada e bioacessibilidade a amostra seca, sem ser microencapsulada, apresentou uma preservação de apenas 0,8% das antocianinas, enquanto a amostra microencapsulada apresentou 26,22% de preservação das antocianinas, logo a tecnologia de microencapsulação aumenta a bioacessibilidade de antocianinas.

O microencapsulamento do extrato aquoso de jabuticaba tem sido demonstrado em matrizes proteicas como proteínas do soro de leite bovino, caseína e proteína isolada de soja (Rocha et al., 2019; Acuña-Avila et al., 2021). Comparativamente às proteínas do soro de leite, isto é, α -lactoglobulina e β -lactoalbumina em sua maioria, possuem melhor ação emulsificante e espessante que as demais proteínas estudadas, o que resulta em maiores eficiências de microencapsulamento dos bioativos extraídos da jabuticaba (Pech-Canul et al., 2020; Yan e Zhang 2014; Teimouri et al., 2022). A beta-lactoglobulina (50%-60% das proteínas do soro de leite bovino) é uma proteína globular (162 resíduos de aminoácidos), com propriedade termo gelificante, já alfa-lactoalbumina (~ 20% das proteínas do soro) é uma metaloproteína de cálcio (123 resíduos de aminoácidos), quando ambas são combinadas há aumento de formação de gel e melhoria nas características do gel, tais como força, rigidez ou viscoelasticidade, logo um efeito sinérgico dessas duas proteínas (O'Mahony e Fox, 2014). Além de serem proteínas solúveis em pH de 4,6, o que não ocorre com a caseína (Pech-Canul et al., 2020).

Porém proteínas vegetais possuem melhor interação com compostos bioativos hidrossolúveis, que é o caso das antocianinas (Li et al., 2021). Nos últimos anos, proteínas vegetais, como a isolada de soja e a de ervilha, têm sido investigadas como materiais alternativos de parede no microencapsulamento de compostos hidrossolúveis, como as antocianinas (Xue et al., 2024). Essas proteínas apresentam características estruturais favoráveis à interação com compostos fenólicos por meio de ligações hidrogênio e interações hidrofóbicas, o que pode contribuir para a retenção e estabilidade dos bioativos (Teimouri et

al., 2022; Pech-Canul et al., 2020). No entanto, quando comparadas às proteínas do soro de leite, as proteínas vegetais frequentemente apresentam menor solubilidade em ampla faixa de pH, menor capacidade emulsificante e inferior estabilidade térmica, o que pode impactar a eficiência de encapsulamento e a liberação controlada dos ativos (Yan e Zhang, 2014; Rocha et al., 2019). Assim, embora promissoras, as proteínas vegetais ainda exigem estratégias tecnológicas para otimizar seu desempenho como matrizes encapsulantes.

Em relação às técnicas mais usuais para a produção de microcápsulas a base de proteínas como material de parede, a secagem por atomização (spray drying) se destaca pela possibilidade de produção contínua de cápsulas em escala industrial (Bruschi et al., 2003). Nessa técnica, o composto de interesse é dispersado em uma suspensão do material de parede que é atomizado e colocado em contato com uma corrente de ar quente. Como resultado, as gotículas da suspensão contendo o ativo são desidratadas, a uma taxa de evaporação constante, ocorrendo uma rápida taxa de difusão da água do núcleo da gotícula para sua superfície, assim produzindo microcápsulas secas (Gharsallaoui et al., 2007; McCabe et al., 1993).

Considerando a instabilidade das antocianinas e o potencial da casca de jabuticaba como fonte de compostos bioativos, este estudo propõe o microencapsulamento como estratégia para protegê-las durante o processamento e a digestão. A pesquisa se justifica pela necessidade de avaliar o efeito da substituição parcial da proteína do soro de leite isolada por proteínas vegetais (soja e ervilha) na eficiência de encapsulamento e na preservação da bioacessibilidade das antocianinas ao longo do trato gastrointestinal.

Materiais e métodos

1.1 Materiais

A jabuticaba (*Plinia cauliflora*) (Figura 01), da variedade Sabará, na sua forma in natura foi obtida do pomar do Departamento de Fruticultura da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, localizado nas seguintes coordenadas geográficas: 20°45'26.8"S e 42°52'07.1"O. Já as proteínas do soro isolada, proteína de soja e de ervilha foram adquiridas na empresa Growth Suplementos.



Figura 1: Jabuticabas da variedade Sabará do pomar da Universidade Federal de Viçosa.

1.2 Metodologia

1.2.1 Preparação do Extrato Hidrossolúvel de Casca de Jabuticaba

O método usado para extrair compostos bioativos da casca de jabuticaba envolve o uso de etanol acidificado e o uso de banho ultrassônico, conforme apresentado na Figura 2.

Seguindo a metodologia proposta por Rocha et al. (2017), com modificações. No qual 100 g da casca da jabuticaba foram trituradas em mixer com 1000 mL de uma solução de etanol 75% (v/v) acidificada com ácido clorídrico (HCl 1,5N) até pH 2,0. Todo o material foi extraído em um banho ultrassônico (Elmasonic TI-H10, Elma, Alemanha) por 50 minutos a 45 kHz e 40 °C.

Desta forma o extrato que era hidroalcoólico, se torna aquoso e foi filtrados a vácuo utilizando papel de filtro Whatman nº1 e, em seguida, concentrados em evaporador rotativo (IKA RV 10, LabScience, Staufen, Alemanha) a 40 °C até atingir o teor de sólidos solúveis totais (SST) de 5°Brix (cerca de 20% do volume inicial), O teor de SST foi determinado por meio do uso de refratômetro (Highmed, HM-427, São Paulo, Brasil). O extrato foi acondicionado em frasco âmbar sob refrigeração (5 ± 1 °C) para posteriores análises.

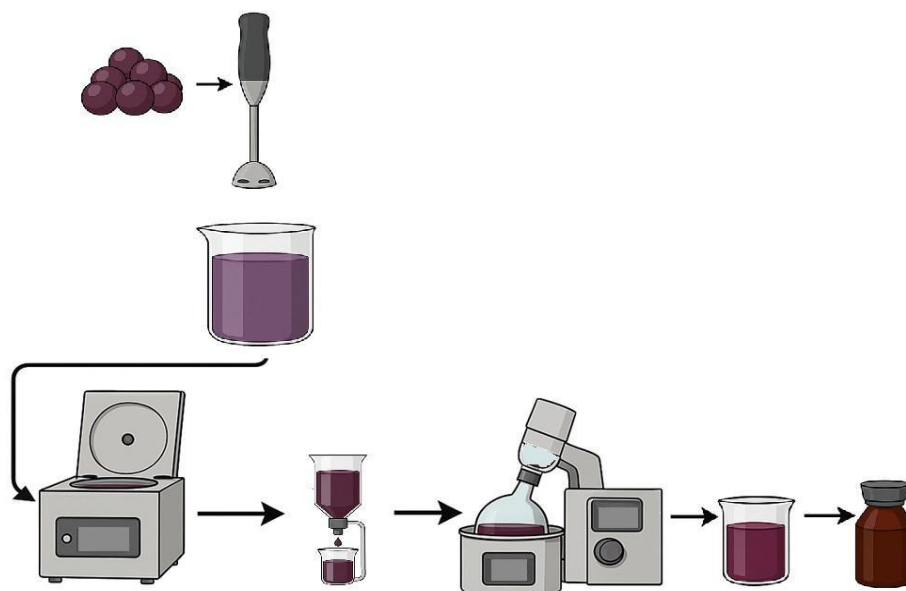


Figura 2: Fluxograma de obtenção do extrato aquoso da casca de jabuticaba.

1.2.2 Análises do Extrato

1.2.2.1 Colorimetria

O extrato foi caracterizado quanto à cor por meio de leitura direta de reflectância no sistema de coordenadas retangulares L^* , a^* e b^* , utilizando a escala CIELAB, com iluminante D65 e ângulo de observação de 10 °, em colorímetro Hunter Lab (modelo ColorQuest XE, Reston, EUA). A partir das coordenadas a^* e b^* , foram calculados os

valores de croma (C^*) e ângulo de matiz (h), conforme Equações 1 e 2.

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

$$h = \arctan(b^*/a^*) \quad (2)$$

1.2.2.2 Determinação de Antocianinas Totais - Método pH Único

O teor de antocianinas totais foi determinado de acordo com o método de pH único descrito por Fuleki e Francis (1968). Uma alíquota das amostras, que se adeque aos parâmetros da curva padrão, será diluída com uma solução de etanol:HCl (1,5 N) na proporção 85:15 (v/v) até que a absorbância das amostras atinja valores entre 0,200 e 0,800 quando submetidas a um comprimento de onda de 535 nm, leitura em espectrofotômetro UV-VIS (UV-M51 marca Bel, Monza, Itália).

1.2.2.3 Determinação de Fenólicos Totais

O teor de fenólicos totais foi determinado através da metodologia descrita por Singleton e Rossi (1965), com modificações. 0,6 mL dos extratos serão adicionados em 3,0 mL do reagente Folin-Ciocalteu previamente diluído em água destilada na proporção de 1:10 (v/v) e mantidos por 3 minutos em ambiente escuro à 25 ± 1 °C. 2,4 mL de solução saturada de Na₂CO₃ (carbonato de sódio) 7,5% (m/v) foram adicionados à mistura e deixados para reagir por 1 hora a 25 °C na ausência de luz. A medida da absorbância foi realizada a 760 nm utilizando espectrofotômetro UV-VIS (UV-M51 marca Bel, Monza, Itália), tendo a curva analítica construída por meio de solução de ácido gálico em diferentes concentrações, após reação com Folin-Ciocalteu e Na₂CO₃.

1.2.2.4 Avaliação da Capacidade Antioxidante ABTS (2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolina-6-sulfonado), FRAP (Poder Antioxidante Redutor Férrico)

A análise da capacidade antioxidante pelo método do radical ABTS foi realizada conforme a metodologia descrita por Re et al. (1999), com modificações. O radical ABTS foi gerado pela reação em proporções iguais de ABTS 7 mM e persulfato de potássio 2,45 mM, sendo a solução incubada em banho-maria a 50 °C por 15 minutos. Posteriormente, o radical ABTS foi diluído em etanol 80 % até que a absorbância atingisse $0,700 \pm 0,005$ a 734 nm. 100 µL da diluição do extrato foram reagidos com 700 µL da solução do radical ABTS, mantendo-se a reação por 6 minutos. As leituras de absorbância foram realizadas a 734 nm em leitor de microplacas (Multiskan Skyhigh, Thermo Fisher Scientific, EUA). Para essa análise, utilizaram-se quatro diluições diferentes da amostra em etanol 80 % PA para a construção da curva da amostra. Também foi empregada uma curva padrão de Trolox, e os resultados foram expressos em micromoles de equivalentes de Trolox por mililitro de extrato aquoso ($\mu\text{M ET} \cdot \text{mL}^{-1}$ de extrato aquoso).

A análise da capacidade antioxidante pelo método FRAP foi realizada conforme a metodologia de Boroski et al. (2015), com modificações. O reagente FRAP foi preparado pela reação entre tampão acetato 0,3 M, TPTZ 10 mM e cloreto férrico 20 mM, na proporção 10:1:1. Em seguida, 8 µL da diluição da amostra foram reagidos com 24 µL de água destilada e 240 µL do reagente FRAP, mantendo a mistura a 37 ± 1 °C por 30 minutos. As leituras de absorbância foram realizadas a 595 nm, utilizando um leitor de microplacas (Multiskan Skyhigh, ThermoFisher Scientific, EUA). Para essa análise, o extrato foi diluído em água, em cinco diferentes concentrações para construção da curva da amostra. Utilizou-se também uma curva padrão de sulfato ferroso, e os resultados foram expressos em µM de equivalentes de ferro (II) por mL de extrato aquoso ($\mu\text{M Fe}^{2+} \cdot \text{mL}^{-1}$ de extrato aquoso).

1.2.3 **Preparação das Soluções de Material de Parede**

Com base em ensaios prévios realizados no laboratório, definiu-se a concentração de 15% de material de parede em solução. Foram testadas quatro proteínas como agentes encapsulantes: proteína isolada do soro de leite (WPI), proteínas de ervilha, soja e arroz, em diferentes combinações com WPI (100%, 75%, 50%). Após hidratação overnight, apenas as formulações com 100% WPI, 75% WPI + 25% proteína de ervilha e 75% WPI + 25% proteína de soja apresentaram estabilidade e compatibilidade com o processo de secagem por atomização, sendo as demais descartadas.

Para a fração líquida da solução (85%), testaram-se três proporções de extrato (15%, 30% e 45%). A concentração de 30% foi selecionada por apresentar o maior teor de extrato sem causar precipitação proteica.

As soluções foram hidratadas overnight a 25 °C, contendo as proteínas e água destilada. O extrato foi adicionado apenas no dia da secagem. As misturas foram então homogeneizadas em agitador magnético na velocidade 3 (C-MAG HS 7, marca IKA, Staufen, Alemanha).

1.2.4 **Microencapsulação por Spray Drying**

A secagem por atomização foi realizada em spray dryer (modelo B-191, marca Büchi, Flawil, Suíça), conforme parâmetros descritos por Silva et al. (2013). O processo operou em contracorrente, com fluxo de alimentação de aproximadamente 485 mL·h⁻¹ (capacidade de bombeamento de 27 %), temperatura de entrada do ar de 180 ± 5 °C, temperatura de saída de 45 ± 5 °C, vácuo de 20 mbar e aspiração de 28 m³·h⁻¹. Os pós obtidos foram acondicionados em embalagens de polietileno laminado, selados a vácuo, protegidos da luz e armazenados sob congelamento a -4 °C.

1.2.5 **Caracterização das Micropartículas**

1.2.5.1 **Colorimetria**

A caracterização da cor das micropartículas foi conduzida de acordo com o item 2.2.2.1.

1.2.5.2 **Teor de Antocianinas Totais**

O teor de antocianinas totais foi determinado de acordo com o método de pH único descrito por Fuleki e Francis (1968), com modificações. As amostras foram solubilizadas em água destilada (5% m/v) e posteriormente diluídas em etanol/HCl 1,5N (85:15) v/v, agitadas em vortex (Vortex Multi 0-3000-Craltech, Barcelona, Espanha) por 2 minutos e centrifugadas a 5000 rpm por 10 minutos (Centrifuge 5804 R, Eppendorf, Alemanha), o sobrenadante foi

submetido a leitura no espectrofotômetro UV-VIS (UV-M51 marca Bel, Monza, Itália), em comprimento de onda de 535 nm.

1.2.5.3 **Teor de Fenólicos Totais**

A análise de fenólicos totais das micropartículas foi realizada conforme a metodologia de Singleton e Rossi (1965), com modificações. As amostras foram diluídas em água destilada, As micropartículas foram diluídas em água destilada e agitadas em misturador rotativo (30 rpm, overnight; JOANLAB Lab 360° Disc Mixer) e posteriormente centrifugadas a 5.000 rpm por 10 minutos (Centrifuge 5804 R, Eppendorf, Alemanha). O sobrenadante obtido foi utilizado como amostra para a análise. A reação foi conduzida com 500 μL de solução de carbonato de sódio a 7,5 % e 100 μL do sobrenadante. A mistura foi agitada por 3 minutos e, em seguida, adicionaram-se 400 μL da solução do reagente de Folin-Ciocalteu (1:10), mantendo a reação por 1 hora, protegida da luz. As leituras de absorbância foram realizadas a 760 nm, em leitor de microplacas (Multiskan Skyhigh, Thermo Fisher Scientific, EUA). Utilizou-se uma curva padrão de ácido gálico, e os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por mililitro da solução da amostra ($\text{mg EAG} \cdot \text{mL}^{-1}$).

1.2.5.4 **Absorção de antocianinas como eficiência do processo de microencapsulamento**

A determinação da eficiência do processo de microencapsulamento foi baseada na quantificação das antocianinas totais presentes nas micropartículas, considerando a fração absorvida no interior das micropartículas e a adsorvida na superfície das partículas. Para tal foi utilizada a metodologia de Robert et al. (2010), com modificações.

Para a quantificação das antocianinas superficiais, as amostras foram inicialmente solubilizadas em água destilada (5 % m/v) e, em seguida, diluídas em etanol/HCl 1,5 N (85:15, v/v). A mistura foi agitada em vórtex (Vortex Multi 0-3000, Craltech, Barcelona, Espanha) por 2 minutos e centrifugada a 5.000 rpm por 10 minutos (Centrifuge 5804 R, Eppendorf, Alemanha). O sobrenadante obtido foi utilizado para leitura em espectrofotômetro UV-VIS (UV-M51, Bel, Monza, Itália) a 535 nm. A extração foi conduzida de forma rápida e sem ruptura da parede, permitindo a liberação apenas dos compostos presentes na superfície.

Já a quantificação das antocianinas totais, as amostras (5 % m/v) foram submetidas a agitação em vórtex por 30 segundos, seguidas de tratamento em banho ultrassônico (45 °C, 2 horas), com agitação em vórtex a cada 5 minutos para garantir a completa ruptura das micropartículas. Após esse processo, a solução foi diluída em etanol/HCl 1,5 N (85:15, v/v), agitada em vórtex por 2 minutos e centrifugada a 5.000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi então submetido à leitura espectrofotométrica a 535 nm, nas mesmas condições descritas anteriormente.

Com base nos valores obtidos, a porcentagem de compostos na superfície (CS) e a eficiência de microencapsulamento (EM) foram calculadas pelas equações:

$$CS = \frac{\text{Compostos de Superfície}}{\text{Total Teórico de Compostos}} * 100\% \quad (3)$$

$$EM(\%) = 100 - CS(\%) \quad (4)$$

1.2.5.5 Capacidade Antioxidante

A análise da capacidade antioxidante pelo método do radical ABTS foi realizada conforme a metodologia descrita por Re et al. (1999), com modificações. O radical ABTS foi gerado pela reação em proporções iguais de ABTS 7 mM e persulfato de potássio 2,45 mM, sendo a solução incubada em banho-maria a 50 °C por 15 minutos. Posteriormente, o radical ABTS foi diluído em etanol 80 % até que a absorbância atingisse $0,700 \pm 0,005$ a 734 nm.

As micropartículas foram diluídas em água destilada e submetidas à agitação em misturador rotativo (30 rpm, *overnight*; JOANLAB Lab 360° Disc Mixer), seguidas de centrifugação a 5.000 rpm por 10 minutos (Centrifuge 5804 R, Eppendorf, Alemanha). O sobrenadante obtido foi utilizado como amostra. Em seguida, 100 µL da diluição da amostra foram reagidos com 700 µL da solução do radical ABTS, mantendo-se a reação por 6 minutos. As leituras de absorbância foram realizadas a 734 nm em leitor de microplacas (Multiskan Skyhigh, Thermo Fisher Scientific, EUA). Para essa análise, utilizaram-se quatro diluições diferentes da amostra em etanol 80 % PA para a construção da curva da amostra. Também foi empregada uma curva padrão de Trolox, e os resultados foram expressos em micromoles de equivalentes de Trolox por grama de micropartículas ($\mu\text{M ET} \cdot \text{g}^{-1}$).

micropartículas).

A análise da capacidade antioxidante pelo método FRAP foi realizada conforme a metodologia de Re et al. (1999), com modificações. O reagente FRAP foi preparado pela reação entre tampão acetato 0,3 M, TPTZ 10 mM e cloreto férrico 20 mM, na proporção 10:1:1. Em seguida, 8 µL da diluição da amostra foram reagidos com 24 µL de água destilada e 240 µL do reagente FRAP, mantendo a mistura a 37 ± 1 °C por 30 minutos. As leituras de absorbância foram realizadas a 595 nm, utilizando um leitor de microplacas (Multiskan Skyhigh, Thermo Fisher Scientific, EUA). Para essa análise, as micropartículas foram diluídas em água destilada e agitadas em misturador rotativo (30 rpm, overnight; JOANLAB Lab 360° Disc Mixer), sendo então centrifugadas a 5.000 rpm por 10 minutos (Centrifuge 5804 R, Eppendorf, Alemanha). O sobrenadante se tornou a amostra, foram utilizadas cinco diluições diferentes da amostra em água para construção da curva da amostra. Utilizou-se também uma curva padrão de sulfato ferroso, e os resultados foram expressos em µM de equivalentes de ferro (II) por grama de micropartículas ($\mu\text{M Fe}^{2+}\text{E}\cdot\text{g}^{-1}$ de solução de micropartículas).

1.2.5.6 Morfologia das Cápsulas: Técnica utilizada (Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV)

As micropartículas foram previamente recobertas com ouro em metalizador por pulverização catódica (Sputter Coater, modelo FDU010, Bal-Tec, Balzers, Liechtenstein). As análises morfológicas foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento modelo 1430 VP (LEO, Cambridge, Inglaterra), operado com o software Iridium Ultra. Os equipamentos utilizados pertencem ao Núcleo de Microscopia e Microanálise da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

1.2.5.7 FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

A análise de FTIR foi realizada num espectrômetro Nicolet 6700 (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, EUA) equipado com acessório ATR com cristal de germânio. Os espectros foram obtidos numa resolução de 4 cm⁻¹ com número de onda de 4000 a 700 cm⁻¹ e 32 varreduras foram realizadas para cada espectro. Foram realizados os processamentos de

normalização da intensidade de absorção e a correção da linha de base.

1.2.5.8 **Potencial Zeta e Tamanho de Partícula**

Para a aferição valores e sinais do potencial ζ (potencial Zeta) das cadeias/partículas das micropartículas em dispersão, será utilizado uma amostra diluída das micropartículas em água destilada, com a concentração $0,3\% \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ (Silva, 2018). A determinação do potencial Zeta será conduzida no equipamento Zetasizer Nano Series (Zen 3600, Malvern Instruments, Reino Unido). 1 mL das dispersões serão transferidos para a célula capilar de medição, no qual no interior do equipamento, serão expostas a um campo elétrico constante a $25,0 \pm 0,1$ °C. A determinação dos diâmetros hidrodinâmicos das cadeias/partículas dispersas das micropartículas, o tamanho de partícula, será utilizado o espalhamento dinâmico de luz, no mesmo aparelho citado anteriormente, com amostra de mesma diluição, no qual amostras de 1 mL das dispersões serão transferidas para a célula capilar de medição, essa será inserida dentro do equipamento, e um laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) será disparado nessas amostras, a $25,0 \pm 0,1$ °C. Deste modo a análise das distribuições de tamanho será realizada por meio da amplitude da taxa de decaimento, $A(\Gamma)$, que será obtida pelo ajuste da função de correlação de volume temporal normalizada, $g^2(t)$, isto será dado por meio do algoritmo Non-Negative Least Square (NNLS) (Galván et al., 2018).

1.2.5.9 **Estabilidade das Micropartículas**

Aplicando o método de Rigolon et al. (2024), com modificações, as micropartículas foram diluídas a 5% (m/v) em água destilada e avaliadas durante o armazenamento sob duas condições distintas. Um grupo foi acondicionado em embalagem transparente hermética e armazenado em câmara de luz (TrueVue® 2, Datacolor, Xangai, China), exposto à radiação de duas lâmpadas fluorescentes (simulando luz do dia) a uma temperatura controlada de 25 ± 2 °C. O segundo grupo foi armazenado em embalagens de polietileno laminado, sob as mesmas condições, visando avaliar o efeito protetor do microencapsulamento contra a luz. Como parâmetro de estabilidade, as antocianinas totais foram quantificadas conforme Fuleki e Francis (1968), utilizando as modificações previamente descritas.

1.2.5.10 **Digestão *In Vitro* das Micropartículas**

O sistema de digestão gastrointestinal simulado incluiu duas etapas (gástrica e intestinal) e foi adaptado do protocolo descrito por Minekus et al. (2014). A fase oral foi omitida, considerando que tanto o extrato líquido quanto as amostras microencapsuladas são diretamente consumidos, com tempo de permanência insignificante na cavidade oral.

Para a simulação, 2,37 g de extrato de jabuticaba (controle), quantidade equivalente à fração teórica presente em 1,5 g de micropartículas, foram dissolvidos em 10 mL de água Milli-Q em tubos Falcon de 50 mL. As amostras de micropartículas (1,5 g) também foram diluídas em 10 mL de água Milli-Q.

Na etapa gástrica, adicionaram-se às amostras: 7,5 mL de fluido gástrico simulado (FGS), 1,6 mL de solução estoque de pepsina suína (25.000 U/mL; pepsina da mucosa gástrica suína ≥ 500 U/mg de proteína, Sigma-Aldrich), 15 μ L de CaCl_2 0,1 M, 710 μ L de HCl 1,0 M (para ajuste de pH a 2,0) e 175 μ L de água destilada. A mistura foi incubada em agitador em banho-maria (Banho Dubnoff, Quimis Aparelhos Científicos, São Paulo, Brasil), a 37 °C e velocidade 8, por 2 horas, protegida da luz.

Finalizada a etapa gástrica, deu-se início à digestão intestinal com a adição de: 11 mL de fluido intestinal simulado (FIS), 5,0 mL de solução de pancreatina (800 U/mL; pancreatina de pâncreas suíno 4 $\times$ USP, Sigma-Aldrich), 3,0 mL de solução de sais biliares (200 mg/mL), 40 μ L de CaCl_2 0,3 M, 660 μ L de NaOH 1,0 M (para ajuste de pH a 7,0) e 300 μ L de água destilada.

As amostras foram novamente incubadas em agitador com banho-maria (Banho Dubnoff, Quimis Aparelhos Científicos, São Paulo, Brasil), a 37 °C, por 2 horas, a velocidade 8.

Ao final de cada etapa (gástrica e intestinal), as amostras foram congeladas a -4 °C para interromper as reações enzimáticas. Para a recuperação das antocianinas, as soluções descongeladas tiveram o pH ajustado para 3,0 e foram centrifugadas a 5.000 rpm por 20 minutos (Centrifuge 5804 R, Eppendorf, Alemanha). Todas as análises foram conduzidas em triplicata, com digestões independentes para cada amostra.

1.2.5.11 **Colorimetria e quantificação de antocianinas na fase gástrica e intestinal**

As frações sobrenadantes das amostras, coletadas após as fases gástrica e intestinal, foram utilizadas para a análise colorimétrica, conforme o item 2.2.1.1, e quantificação de antocianinas totais, conforme o item 2.2.1.2.

1.2.5.12 Bioacessibilidade

O teor (%) de bioacessibilidade foi Com isso a bioacessibilidade será determinada por meio da seguinte equação (5) (Dantas et al., 2019).

$$B(\%) = \frac{FI}{FB} * 100 \quad (5)$$

na qual, B(%) representa a bioacessibilidade, FI representa a ingerida, FB representa a fração presente no sobrenadante da fase intestinal.

1.2.5.13 Análise Estatística

Todas as análises foram realizadas em três repetições e os resultados são apresentados como médias $\pm$ desvio padrão. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey utilizando-se o software R (versão 4.5.1).

Resultados e Discussão

A cor do extrato da casca de jabuticaba (*Plinia jaboticaba* cv. *Sabará*) é um fator que antes era abordado apenas como pigmento, sendo um corante natural, porém revisão realizada por Sant'Anna et al., (2013) indicam a associação da cor com a bioatividade presente na casca de jabuticaba. No caso do extrato obtido, apresentou coloração escura com baixo valor de L* (luminosidade), indicando elevada intensidade de cor. Os valores médios das coordenadas colorimétricas foram $L = 26,46 \pm 0,01^*$, $a = 12,29 \pm 0,04^*$ e $b = 3,02 \pm 0,04^*$. A partir dessas coordenadas, calculou-se a cromaticidade ($C^* = 12,66 \pm 0,04$) e o ângulo de matiz ($h^* = 13,81^\circ \pm 0,16^\circ$). Esses valores indicam tonalidade avermelhada, característica de extratos com

antocianinas. A cor do extrato se encontra no primeiro quadrante do plano colorimétrico, assim como apresentado na Figura 3.

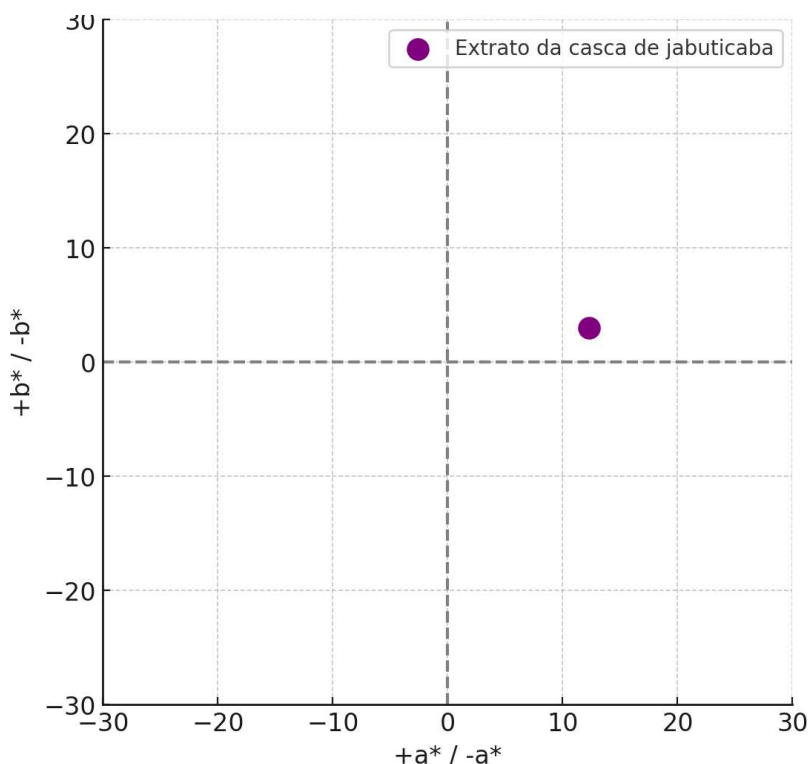


Figura 3: Cor do extrato da casca de jabuticaba no plano colorimétrico.

O extrato da casca da jabuticaba apresentou elevados teores de compostos bioativos, com $250,00 \pm 0,04$ mg/L de antocianinas totais e $2611,66 \pm 0,01$ mg EAG/L de compostos fenólicos totais. Esses valores confirmam o potencial funcional dessa matéria-prima, amplamente atribuído à presença de antocianinas como cianidina-3-O-glicosídeo e delphinidina-3-O-glicosídeo, e de taninos hidrolisáveis, como os elagitaninos (De Andrade Neves et al., 2021). A capacidade antioxidante resultou em: $311,98 \pm 3,69$ mg equivalente de Trolox/mL no ensaio ABTS e $235,39 \pm 1,85$ mg equivalente de Fe^{2+} /mL no ensaio FRAP, indicando alta capacidade na eliminação de radicais livres e de redução férrica. Segundo Viana et al., (2025) a capacidade antioxidante da casca da jabuticaba apresenta efeitos antioxidantes e metabólicos, entre eles a redução de biomarcadores inflamatórios e melhora da sensibilidade à insulina em modelo animal de obesidade induzida. Tais evidências indicam o potencial da casca como ingrediente funcional com aplicações nutraceuticas e farmacológicas.

O extrato foi microencapsulado por meio de secagem por spray dryer, utilizando as

seguintes combinações de materiais de parede: 100% WPI, 75% WPI e 25% proteína de ervilha, 75% WPI e 25% proteína de soja, o que resultou micropartículas com as seguintes características colorimétricas, apresentadas no Quadro 1, e logo em seguida a cor é apresentada no plano colorimétrico da Figura 4.

Quadro 1 - Parâmetros colorimétricos das micropartículas obtidas por secagem em spray dryer

Material de parede	L*	a*	b*	C*	h*
100% WPI	85, 12 ± 0, 02 B	2, 5 ± 0, 01 A	1, 02 ± 0, 02 B	2, 71 ± 0, 01 a	22, 12 ± 0, 44 b
75% WPI e 25% proteína de ervilha	84, 50 ± 0,02 a	2, 67 ± 0, 02 B	1, 31 ± 0, 01 C	2, 97 ± 0, 01 c	26, 16 ± 0, 30 c
75% WPI e 25% proteína de soja	85, 24 ± 0, 04 B	2, 79 ± 0, 01 C	0, 47 ± 0, 01 A	2, 83 ± 0, 01 b	9, 56 ± 0, 22 a

Valores expressos como média ± desvio padrão (DP), n = 3. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

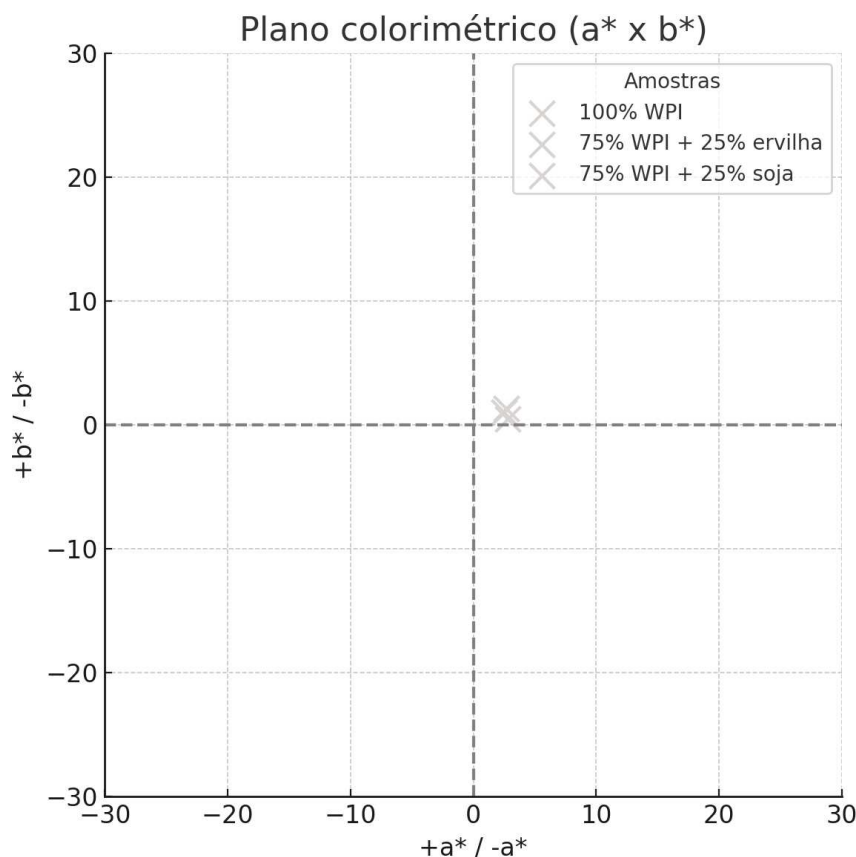


Figura 4: Plano colorimétrico das amostras microencapsuladas.

De acordo com o Quadro 1 com o plano colorimétrico presente na Figura 4, a coloração para cada combinação de material de parede diferiu significativamente ($p < 0,05$), para todos os parâmetros colorimétrico, exceto luminosidade que foi igual estatisticamente para 100% WPI ($85,12 \pm 0,02$) e 75%WPI e 25% proteína de soja ($85,24 \pm 0,04$), que obtiveram maior luminosidade em relação a amostra 75% WPI e 25% proteína de ervilha. Todas as amostras apresentam proximidades com a coloração branca, possuindo $+a^*$ que indica a presença de vermelho.

O material de parede exerce papel determinante na alteração da cor dos microencapsulados, através da capacidade que tem de interagir quimicamente com o composto ativo. Por exemplo, Zhao et al. (2022) demonstraram que micropartículas de flavonoides, de *Cornus officinalis*, tendo como material de parede a combinação de WPI e maltodextrina apresentaram maior luminosidade L^* e menor cromaticidade a^* , em relação a amostra que possui como material de parede proteína de soja isolada e maltodextrina, os autores concluíram que diversos materiais de parede podem ocultar a coloração do material do núcleo de diferentes modos.

Já em termos de compostos bioativos, as micropartículas foram quantificadas em termos de: antocianinas totais, compostos fenólicos totais, capacidade antioxidante (ABTS e FRAP), apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Composição bioativa das micropartículas

Material de parede	Antocianinas totais (mg/g)	Compostos fenólicos totais (mg/g)	FRAP (mg eq. de Fe 2+ /g)	ABTS (mg eq. de Trolox/g)
100% WPI	12,66 ± 0,07 B	35,29 ± 0,02 A	196,61 ± 1,85 A	195,87 ± 0,4,29 C
75% WPI e 25% proteína de ervilha	13,80 ± 0,07 A	43,59 ± 0,01 B	196,92 ± 1,78 A	132,01 ± 1,41 C
75% WPI e 25% proteína de soja	13,71 ± 0,09 A	38,42 ± 0,01 C	196,34 ± 0,69 A	168,16 ± 3,39 B

Valores expressos como média ± desvio padrão (DP), n = 3. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A utilização de diferentes materiais de parede influenciou significativamente a retenção de compostos bioativos pelas micropartículas. Em relação às antocianinas totais, observou-se que as formulações contendo proteínas vegetais (soja e ervilha) associadas ao WPI apresentaram maior teor, sendo a amostra com 75% WPI e 25% ervilha apresentou maior concentração de antocianinas (13,80 ± 0,07 mg/g), seguida da amostra 75% WPI e 25% de proteína de soja (13,71 ± 0,09 mg/g). Já a formulação com 100% WPI apresentou teor de antocianinas (12,66 ± 0,07 mg/g), sendo significativamente diferente das demais. Esses resultados sugerem que a incorporação de proteínas vegetais pode favorecer a complexação ou retenção das antocianinas, possivelmente devido à formação de interações eletrostáticas entre os grupos funcionais das proteínas e das antocianinas. Estudo realizado por Pan et al. (2022) evidenciou que micropartículas de antocianinas de mirtilo preparadas com combinações de WPI e proteína de soja apresentaram melhor retenção e maior eficiência de encapsulamento, em comparação com micropartículas contendo apenas

WPI ou proteína isolada de soja.

De mesmo modo, o teor de compostos fenólicos totais também foi favorecido pela combinação com proteínas vegetais. A amostra com proteína de ervilha apresentou o maior valor ($43,59 \pm 0,01$ mg/g), seguida pela com proteína de soja ($38,42 \pm 0,01$ mg/g), sendo ambas superiores ao valor obtido com WPI puro ($35,29 \pm 0,02$ mg/g) e todas as amostras diferem entre si estatisticamente. A maior afinidade dos fenólicos por essas matrizes pode estar associada à conformação estrutural das proteínas vegetais, com maior potencial de interação com compostos hidrossolúveis. Em estudo de García-Segovia et al. (2021) foi demonstrado que micropartículas de extrato de beterraba produzidas por spray dryer contendo 7 % de proteína de ervilha apresentaram retenção significativamente aumentada de compostos fenólicos e pigmentos betalainas, além de alta eficiência de encapsulamento, em comparação com formulações com menor teor de proteína de ervilha (3,5%). Isso reforça o potencial da proteína de ervilha como material de parede funcional, capaz de proteger compostos hidrossolúveis durante o processo térmico, tal qual foi observado amostra com teor de $43,59 \pm 0,01$ mg/g de fenólicos.

Em relação à capacidade antioxidante determinada pelo método FRAP, os resultados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as amostras ($p > 0,05$), com valores variando entre $196,34 \pm 0,69$ e $196,92 \pm 1,78$ mg eq. Fe^{2+} /g. Essa igualdade estatística indica que, apesar das variações nos teores de compostos fenólicos totais, a atividade redutora foi mantida de forma equivalente entre as amostras. Tal resultado sugere que compostos com alto potencial antioxidante em relação ao radical férrico foram preservados, independentemente do material de parede utilizado. Em contrapartida no método ABTS, observou-se diferença estatística entre as amostras ($p < 0,05$). A amostra com 75% WPI e 25% proteína de ervilha apresentou o menor valor de capacidade antioxidante ($132,01 \pm 1,41$ mg eq. de Trolox/g), enquanto a formulação com 100% WPI foi a que apresentou maior atividade ($195,87 \pm 0,29$ mg eq. de Trolox/g), e a com soja foi intermediária ($168,16 \pm 3,39$ mg eq. de Trolox/g). Sugere-se que essa diferença pode estar relacionada ao modo de interação entre os antioxidantes e o material de parede. O resultado reforça que a maior retenção de fenólicos não necessariamente resulta em maior atividade antioxidante medida, especialmente quando se considera a complexidade das proteínas adotadas como material de parede. De mesmo modo em relação a ensaios de capacidade antioxidante, Nascimento et al. (2023) observaram que, em microcápsulas de suco de uva, obtidas por meio de spray dryer, com diferentes materiais de parede: WPI, pectina e goma-arábica, individualmente e em

combinações, o ensaio FRAP não evidenciou diferença estatística na capacidade antioxidante, mesmo as microcápsulas apresentando variação no conteúdo de fenólicos. Porém, o método ABTS apresentou diferenças significativas nos valores de atividade antioxidante entre as formulações.

Em termos de eficiência do processo de microencapsulamento, foi considerada a eficiência de absorção de antocianina totais no interior das micropartículas, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Absorção de antocianinas como eficiência do processo de microencapsulamento

Material de parede	Eficiência de absorção (%)
100% WPI	61,25 ± 0,14 ^b
75% WPI e 25% proteína de ervilha	64,75 ± 0,12 ^a
75% WPI e 25% proteína de soja	59,55 ± 0,34 ^c

Valores expressos como média ± desvio padrão (DP), n = 3. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A eficiência de absorção de antocianinas durante o processo de microencapsulação mostrou-se significativamente influenciada pela composição do material de parede utilizado ($p < 0,05$), conforme apresentado no Quadro 3. A formulação contendo 75% de proteína do soro (WPI) e 25% de proteína de ervilha apresentou a maior eficiência de absorção ($64,75 \pm 0,12\%$), superando as formulações com 100% WPI ($61,25 \pm 0,14\%$) e 75% WPI com 25% de proteína de soja ($59,55 \pm 0,34\%$). Essa diferença estatística evidencia que a composição proteica do material de parede exerce função determinante na retenção dos compostos bioativos, especialmente os hidrossolúveis como as antocianinas.

A maior eficiência de encapsulação observada na amostra com proteína de ervilha pode estar relacionada à complementaridade entre os perfis de aminoácidos da WPI e da proteína vegetal. A WPI possui aminoácidos sulfurados, como cisteína e metionina, além de conter elevadas concentrações de leucina, isoleucina e valina, conferindo capacidade de formação de filmes e de estabelecer interações hidrofóbicas (Etxabide et al., 2023). Por sua vez, a proteína de ervilha apresenta teores elevados de lisina (5,7 g/100 g), arginina (6,6 g/100 g) e histidina (1,9 g/100 g), superando a WPI em aminoácidos hidrofílicos, embora apresente menor quantidade de metionina e cisteína (Babault et al., 2015). A combinação dessas

proteínas pode ter favorecido interações químicas complementares, envolvendo cadeias laterais carregadas e regiões hidrofóbicas, resultando na formação de uma matriz encapsulante mais eficaz. Essas interações estruturais facilitam a retenção de compostos fenólicos e antocianinas durante a atomização por spray dryer, especialmente por meio de ligações eletrostáticas e de hidrogênio entre os resíduos polares das proteínas vegetais e os grupos fenólicos (Kieserling et al., 2024).

Por outro lado, a menor eficiência de absorção observada na amostra com proteína de soja pode ser atribuída à sua estrutura mais densa e tendência à agregação, que pode limitar a mobilidade dos compostos bioativos durante o encapsulamento, dificultando a formação de complexos estáveis (Nishinari et al., 2014). A proteína soja, mesmo possuindo lisina, apresenta menor solubilidade do que a proteína de ervilha, isso pode impactar negativamente a eficiência do processo (Queirós et al., 2023; Shanthakumar et al., 2022).

As interações químicas entre o material de parede, núcleo bioativo e tecnologia de microencapsulamento, influenciam na configuração física das micropartículas, a Figura 5, apresenta a microscopia eletrônica de varredura das micropartículas em 2500 vezes de aumento.

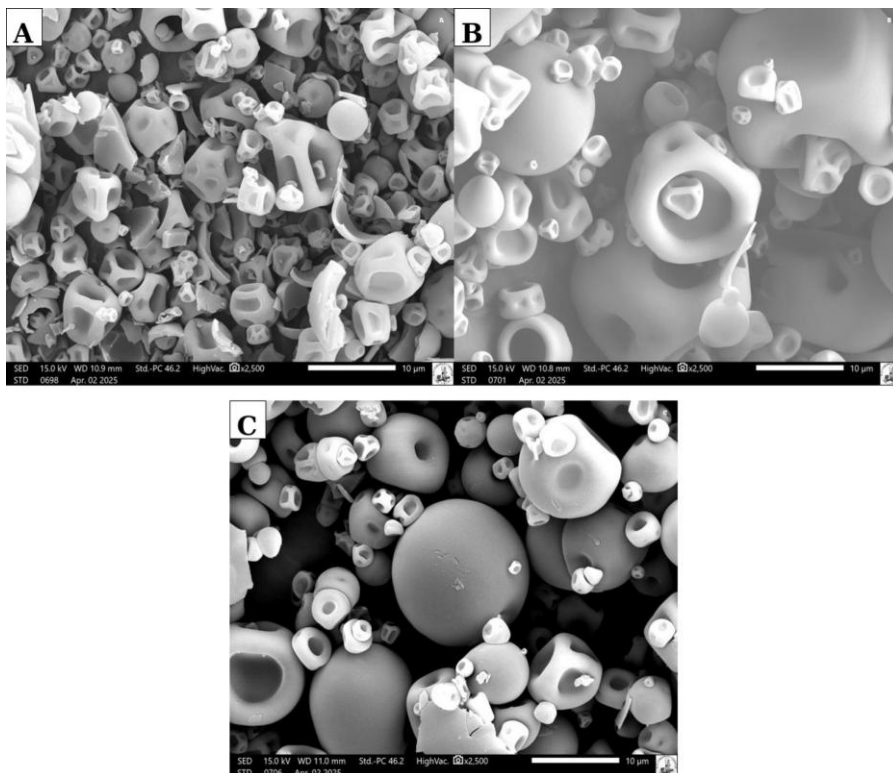


Figura 5: MEV das micropartículas, sendo A, B e C, respectivamente micropartículas dos

seguintes materiais de parede 100% WPI, 75% WPI e 25% proteína de ervilha, 75% WPI e 25% proteína de soja.

Analisando as micrografias apresentadas na Figura 5, observa-se que, apesar das diferenças na composição dos materiais de parede, as três formulações apresentaram morfologia semelhante, caracterizada por micropartículas predominantemente esféricas com presença de invaginações superficiais. Essa característica é comum em partículas obtidas por secagem por spray dryer, resultado da rápida evaporação da água durante o processo, que leva à formação de concavidades devido à contração da superfície da partícula. Além disso, foram observadas partículas com maior esfericidade, porém em menor proporção.

Apesar da presença dessas concavidades, não foram observadas rachaduras aparentes nas micropartículas, o que demonstra a integridade estrutural dos sistemas formados com as diferentes proteínas utilizadas. Isso indica que as combinações de proteínas do soro com proteínas vegetais (ervilha e soja), mesmo em concentrações parciais, foram capazes de formar matrizes resistentes às condições térmicas do processo de secagem, indicando a preservação da estrutura física durante a secagem.

Vergara et al., (2020) encontraram morfologias semelhantes em micropartículas com WPI como material de parede e antocianinas extraída de batatas de polpa roxa como núcleo, tal morfologia foi atribuída à formação precoce de crosta e à perda instantânea de água. Em termos de integridade no processo de microencapsulamento Díaz-Montes (2023) reforça que o uso de proteínas como material de parede, atua de forma a preservar a integridade estrutural das partículas durante o spray dryer.

Do ponto de vista estrutural, a análise por FTIR complementa as observações morfológicas obtidas por MEV, fornecendo evidências da ocorrência de interações químicas entre os compostos bioativos do extrato e as proteínas utilizadas como material de parede. Essas interações são esperadas em sistemas de microencapsulamento, dada a proximidade entre os componentes durante o processo de secagem por spray dryer. Para melhor compreensão dessas interações, os espectros de FTIR foram obtidos não apenas para as micropartículas, mas também individualmente para o extrato da casca de jabuticaba e para cada uma das proteínas utilizadas nas formulações, conforme apresentado na Figura 6.

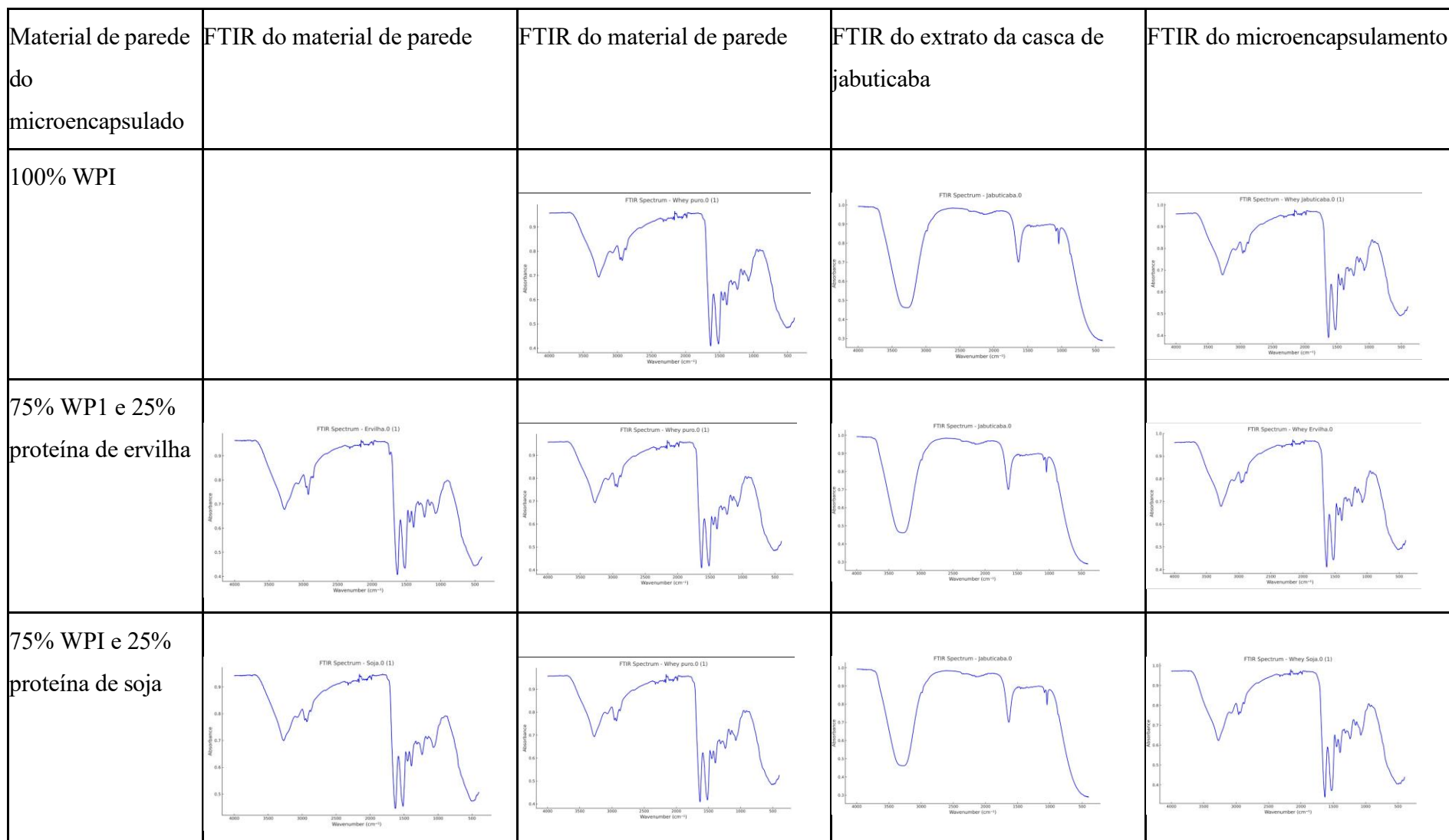


Figura 6: Leituras de FTIR.

A análise espectroscópica por FTIR (Figura 6) foi conduzida com o objetivo de investigar as interações moleculares entre os compostos bioativos do extrato de casca de jabuticaba e os diferentes materiais de parede utilizados nas micropartículas. Inicialmente, os espectros das proteínas isoladas (WPI, proteína de ervilha e proteína de soja) exibiram bandas típicas de estruturas proteicas, notadamente nas regiões correspondentes à Amida I ($\sim 1650\text{ cm}^{-1}$), relacionada ao estiramento da ligação C=O da cadeia peptídica, e à Amida II ($\sim 1540\text{ cm}^{-1}$), atribuída à flexão N-H e estiramento C-N. Adicionalmente, observou-se uma banda larga entre $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, comum às três proteínas, associada ao estiramento O-H e N-H, o que sugere a presença de ligações de hidrogênio intramoleculares.

No espectro do extrato da casca de jabuticaba, destacaram-se bandas entre $1600\text{ e }1450\text{ cm}^{-1}$, atribuídas às vibrações de anéis aromáticos presentes em antocianinas e taninos hidrolisáveis. Também foi registrada uma banda larga em torno de 3300 cm^{-1} , típica de grupos hidroxilas livres presentes nos compostos fenólicos.

Já nos espectros das micropartículas, foram observadas alterações relevantes, como deslocamentos e reduções de intensidade nas bandas das regiões de Amida I e II, bem como na faixa de $1600\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$. Tais modificações são indicativas da ocorrência de interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas entre os grupos funcionais das proteínas (particularmente grupos carboxílicos e aminas) e os grupos fenólicos das antocianinas. O desaparecimento ou redução de bandas atribuídas ao extrato livre sugere a ocorrência de encapsulamento efetivo dos compostos bioativos no interior da matriz proteica.

Além disso, o espectro da formulação com 75% WPI e 25% de proteína de ervilha apresentou maior intensidade e definição das bandas amídicas em comparação às demais, o que pode estar relacionado a uma estrutura tridimensional mais organizada e interações complementares entre os resíduos polares das proteínas animal e vegetal. Em contrapartida, a formulação com proteína de soja demonstrou bandas mais largas e menos definidas, indicando uma possível estrutura menos coesa ou maior heterogeneidade molecular.

As bandas identificadas nos espectros de FTIR, atribuídas a compostos fenólicos e proteínas, são consistentes com a literatura. Resende et al. (2020) caracterizaram a farinha da casca de jabuticaba por meio de FTIR e observaram bandas semelhantes, atribuídas à presença de compostos fenólicos. Barbosa (2007) relatou a presença desses compostos por

meio da identificação simultânea de três regiões espectrais características: 3600–3200 cm^{-1} , correspondente ao estiramento O–H; 1410–1320 cm^{-1} ; e 1260–1180 cm^{-1} , associadas às vibrações de deformação angular do O–H e ao estiramento C–O. Em relação às proteínas, Chylińska et al. (2016) destacaram que a presença de bandas em 1650 cm^{-1} , atribuída à deformação angular N–H (Amida I), e em 1760 cm^{-1} , relacionada à ligação carbonila (C=O), são indicativas de estruturas amídicas, características das cadeias peptídicas.

Esses resultados confirmam que o processo de secagem por spray dryer, aliado à escolha estratégica de materiais de parede, promove a formação de complexos proteína–fenólico estáveis, o que indica microencapsulamento dos compostos bioativos da jabuticaba perante o material de parede. Atingir a técnica de microencapsulamento foi fundamental para a integridade, funcionalidade e proteção dos compostos bioativos durante o armazenamento e a digestão simulada, como será abordado nos próximos tópicos.

Contribuindo para melhor entendimento físico da estrutura das micropartículas o potencial Zeta e tamanho de partícula foram realizados e se encontram no Quadro 4.

Quadro 4 - Potencial Zeta e tamanho da partícula das micropartículas

Material de parede	Potencial Zeta (mV)	Tamanho de partícula (d.nm)
100% WPI	$-20,2 \pm 1,13$ a	$1010,4 \pm 109,09$ a
75% WPI e 25% proteína de ervilha	$-21,03 \pm 0,67$ a	$1132,67 \pm 155,46$ b
75% WPI e 25% proteína de soja	$-21,4 \pm 0,9$ a	$1114,33 \pm 98,19$ b

Valores expressos como média $\pm$ desvio padrão (DP), $n = 3$. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A análise estatística demonstrou que não houve diferença significativa no Potencial Zeta entre as amostras de microencapsulados, independentemente do material de parede, apresentaram valores de Potencial Zeta negativos e relativamente semelhantes (em torno de -20 a

-21 mV). Esses valores indicam estabilidade coloidal moderada, suficiente para prevenir agregação imediata. A ausência de diferença estatística sugere que a substituição parcial do WPI por proteínas vegetais (ervilha ou soja) não comprometeu a carga superficial das partículas formadas. Essa estabilidade pode estar relacionada à presença de grupos ionizáveis em todas as proteínas utilizadas, que conferem repulsão eletrostática semelhante entre as partículas, independentemente da composição da matriz proteica.

Diferente do Potencial Zeta, a análise estatística para o Tamanho de Partícula revelou diferenças significativas entre as amostras. Especificamente, as micropartículas produzidas com 100% WPI apresentaram um tamanho de partícula significativamente menor em comparação com as formulações que continham proteína de ervilha ou proteína de soja. Não houve diferença significativa entre as micropartículas que possuem proteínas vegetais no material de parede, inclusive apresentaram tamanhos médios maiores. Esse aumento pode ser atribuído às diferentes estruturas tridimensionais das proteínas vegetais, que influenciam sua capacidade de reorganização e compactação durante o processo de secagem. Além disso, as proteínas vegetais geralmente possuem maior tendência à agregação e menor solubilidade em relação ao WPI, o que pode favorecer a formação de partículas maiores. Desse modo, os resultados indicam que o uso de proteínas vegetais combinadas com WPI podem alterar o perfil de dispersão das partículas formadas, mas não comprometem sua estabilidade eletrostática.

Ben-Othman et al., (2024), compararam micropartículas oriundas da secagem por spray dryer com material de parede proteínas vegetais (canola) *versus whey protein*, para o encapsulamento de subproduto do vinho, constataram que os sistemas vegetais geram partículas maiores. Os autores atribuíram isso à maior massa molecular e estrutura mais flexível das proteínas vegetais, resultando em formação de micropartículas menos densas e partículas com distribuições de tamanho maiores, enquanto o *whey protein* tende a se reorganizar em partículas mais compactas, favorecendo a formação de estruturas mais densas.

A junção das características químicas e físicas das micropartículas contribuem diretamente para a manutenção da estabilidade durante o armazenamento. As micropartículas armazenadas foram analisadas conforme a preservação de antocianinas por 75 dias, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Variação do teor de antocianinas (mg/g) ao longo do armazenamento sob

diferentes condições de armazenamento

Materiais	Condição	Tempo (dias)				
		0	5	30	45	75
Parede						
75% WPI + 25% proteína de ervilha	Escuro	13.80 ± 0.07 ^{Aa}	13.70 ± 0.02 ^{Aa}	13.78 ± 0.03 ^{Aa}	13.50 ± 0.15 ^{Aa}	13.63 ± 0.09 ^{Aa}
75% WPI + 25% proteína de ervilha	Luz	13.80 ± 0.07 ^{Aa}	13.21 ± 0.82 ^{Ab}	12.58 ± 0.37 ^{Ab}	12.69 ± 0.09 ^{Ab}	12.58 ± 0.07 ^{Ab}
75% WPI + 25% proteína de soja	Escuro	13.71 ± 0.09 ^{Aa}	13.38 ± 0.05 ^{Aa}	13.29 ± 0.05 ^{Aa}	13.38 ± 0.05 ^{Aa}	13.23 ± 0.11 ^{Aa}
75% WPI + 25% proteína de soja	Luz	13.71 ± 0.09 ^{Aa}	13.33 ± 0.06 ^{Ab}	12.10 ± 0.10 ^{Ab}	12.09 ± 0.10 ^{Ab}	12.08 ± 0.06 ^{Ab}
100% WPI	Escuro	12.66 ± 0.07 ^{Aa}	12.11 ± 0.05 ^{Aa}	11.99 ± 0.07 ^{Aa}	11.98 ± 0.07 ^{Aa}	11.92 ± 0.06 ^{Aa}
100% WPI	Luz	12.66 ± 0.07 ^{Aa}	11.31 ± 0.08 ^{Ab}	10.71 ± 0.07 ^{Ac}	10.68 ± 0.07 ^{Ac}	10.72 ± 0.07 ^{Ac}

Valores expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas entre os materiais de parede (WPI 100%, 75 % WPI + Pea 25% e 75% WPI + Soy 25%) sob a mesma condição de armazenamento (Luz e escuro) e tempo. Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferenças

significativas entre as condições de armazenamento para o mesmo material de parede e tempo.

A formulação contendo 75% WPI + 25% proteína de ervilha armazenada no escuro apresentou a menor perda de antocianinas ao final do período ($13,63 \pm 0,09$ mg/g), demonstrando ser a mais eficaz na proteção dos compostos bioativos. A presença da proteína de ervilha, rica em aminoácidos polares, pode favorecer a formação de interações eletrostáticas e de hidrogênio com as antocianinas, contribuindo para sua maior estabilidade. Sob condição de luz, essa mesma formulação apresentou maior degradação ($12,58 \pm 0,08$ mg/g), o que destaca o efeito deletério da exposição luminosa na estabilidade dos pigmentos, mesmo com uma matriz proteica mista. A luz é conhecida por acelerar reações de degradação, especialmente em compostos fenólicos sensíveis como as antocianinas.

A formulação com 75% WPI + 25% proteína de soja mostrou comportamento semelhante, mas com maiores perdas, especialmente sob luz ($12,08 \pm 0,06$ mg/g), indicando menor eficiência protetiva da proteína de soja em relação à de ervilha. A menor solubilidade e a tendência à agregação da proteína de soja podem explicar a formação de uma matriz menos coesa, facilitando a degradação dos compostos encapsulados.

A amostra com 100% WPI foi a que apresentou os menores teores ao final do período de armazenamento, tanto na luz quanto no escuro ($11,02 \pm 0,07$ mg/g e $11,09 \pm 0,07$ mg/g, respectivamente). Isso reforça a hipótese de que a combinação de proteínas vegetais com WPI aumenta a eficiência da proteção, possivelmente por mecanismos complementares de interação com os bioativos.

A exposição à luz degradou significativamente as antocianinas em todas as amostras, alinhando-se com a literatura que aponta a fotodegradação como principal mecanismo de degradação desses compostos bioativos durante o armazenamento (Deng et al., 2023).

Já sobre a degradação de compostos bioativos durante a digestão *in vitro* foi estudado os parâmetros colorimétricos ao fim de cada fase, como apresentado no Quadro 5 e 6, com o plano cromatográfico representado na Figura 7. Por fim, a digestão *in vitro*, fase gástrica e intestinal, das micropartículas teve sua bioacessibilidade representada em teor de antocianinas, representada pela Figura 8.

Quadro 5 - Parâmetros colorimétricos ao fim da fase gástrica e da fase intestinal

	Amostra	L*	a*	b*	C*	h*
Fase gástrica	Extrato da casca de jabuticaba	28,46 ± 0,17a	12,25 ± 0,04a	2,96 ± 0,02a	12,61 ± 0,03a	13,57 ± 0,12a
	100% WPI	30,86 ± 0,04B	13,24 ± 0,02b	3,49 ± 0,01b	13,69 ± 0,02b	14,75 ± 0,02b
	75% WPI e 25% proteína de ervilha	35,28 ± 0,14C	16,13 ± 0,03c	5,45 ± 0,04c	17,02 ± 0,03c	18,67 ± 0,10c
	75% WPI e 25% proteína de soja	34,04 ± 0,31D	17,95 ± 0,03d	5,66 ± 0,01d	18,82 ± 0,02d	17,5 ± 0,04d

Valores expressos como média ± desvio padrão (DP), n = 3. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quadro 6 - Parâmetros colorimétricos ao fim da fase intestinal

	Amostra	L*	a*	b*	C*	h*
Fase intestinal	Extrato da casca de jabuticaba	43, 53 ± 0, 11 C	5, 58 ± 0, 01 c	4, 24 ± 0, 01 D	7, 01 ± 0, 01 c	37, 21 ± 0, 07 a
	100% WPI	41, 32 ± 0, 15 A	7, 40 ± 0, 01 a	5, 27 ± 0, 02 A	9, 08 ± 0, 00 a	35, 49 ± 0, 10 b
	75% WPI e 25% proteína de ervilha	40, 62 ± 0, 02 B	7, 65 ± 0, 03 b	4, 91 ± 0, 01 B	9, 09 ± 0, 02 a	32, 68 ± 0, 16 c
	75% WPI e 25% proteína de soja	40, 68 ± 0, 01 B	7, 37 ± 0, 02 d	4, 68 ± 0, 02 C	8, 73 ± 0, 02 b	32, 42 ± 0, 07 d

Valores expressos como média ± desvio padrão (DP), n = 3. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

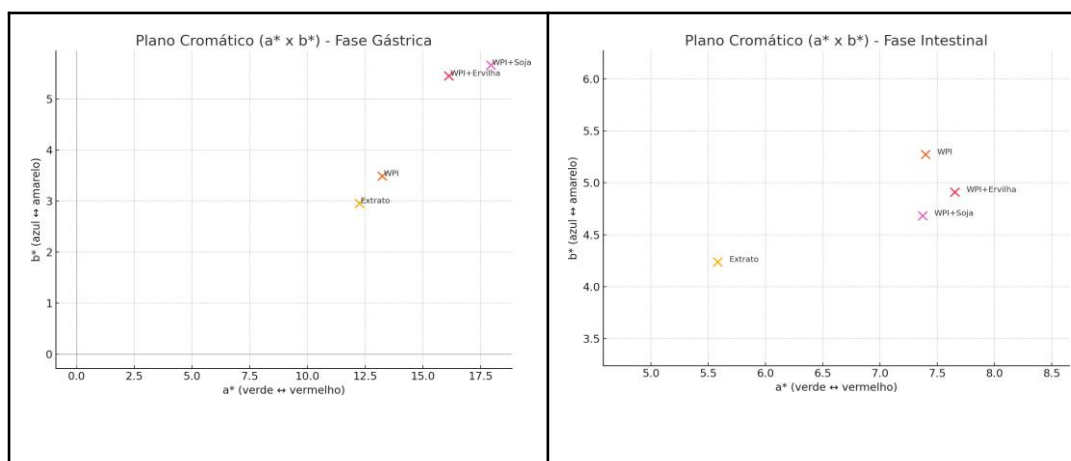


Figura 7: Plano cromático ao final de cada fase da digestão *in vitro*.

A análise colorimétrica foi conduzida sobre o sobrenadante obtido ao final da fase gástrica da digestão *in vitro*, representando a fração bioacessível dos compostos solúveis liberados sob condições de pH ácido e ação enzimática da pepsina. Os resultados indicam a diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) em todos os parâmetros avaliados (L^* , a^* , b^* , C^* e h^*), conforme teste de Tukey.

O extrato da casca de jabuticaba, sem encapsulação, apresentou o menor valor de L^* ($28,46^d$), indicando coloração mais escura, característica de extratos ricos em antocianinas. Com a microencapsulação, observou-se aumento na luminosidade, com destaque para a formulação com 75% WPI + 25% proteína de ervilha, que apresentou o maior L^* ($35,28^a$), seguida da formulação com soja ($34,04^b$) e da WPI isolada ($30,86^c$). Esse comportamento pode ser atribuído à dispersão dos pigmentos no meio gástrico, favorecida pela liberação controlada a partir da matriz encapsulante.

Nos parâmetros a^* e b^* , que refletem os eixos vermelho e amarelo, respectivamente, também foram observadas diferenças significativas. O valor de a^* aumentou de $12,25^d$ no extrato para $17,95^a$ na formulação com soja, sugerindo maior liberação ou proteção dos pigmentos corantes. Para b^* , o extrato apresentou o menor valor ($2,96^d$), enquanto a formulação com soja obteve o maior ($5,66^a$), o que reforça a modificação cromática induzida pela matriz de encapsulamento.

O croma (C^*), que expressa a intensidade da cor, seguiu a mesma tendência: o extrato apresentou o menor valor ($12,61^d$), enquanto a formulação com soja obteve o maior ($18,82^a$), seguida pela com ervilha ($17,02^b$) e WPI ($13,69^c$). Esses dados indicam que as proteínas vegetais não apenas protegeram os compostos fenólicos, mas também favoreceram a liberação de pigmentos mais saturados no sobrenadante gástrico.

Por fim, o ângulo de matiz (h^*) foi maior nas amostras encapsuladas, especialmente com ervilha ($18,67^a$), refletindo uma transição da coloração arroxeada do extrato ($13,57^d$) para tons mais amarelados, devido a possíveis alterações estruturais dos pigmentos em pH ácido ou formação de complexos com as proteínas.

Deste modo, os resultados evidenciam que a composição da matriz de encapsulamento exerce influência direta sobre as características ópticas da fração bioacessível. A digestão dos microencapsulados com proteínas vegetais, gera cores mais claras, intensas (Figura 6) no sobrenadante da fase gástrica, refletindo maior retenção e solubilização dos compostos fenólicos sob as condições simuladas de digestão na fase gástrica.

Já na fase intestinal Os parâmetros colorimétricos da fração bioacessível intestinal (sobrenadante ao final da digestão simulada) apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para todos os atributos avaliados (L^* , a^* , b^* , C^* e h^*), conforme indicado pelas letras distintas nas colunas.

O valor de L^* (luminosidade) variou entre 40,62 e 43,53, sendo o maior observado no extrato da casca de jabuticaba (43,53^c), seguido pelas formulações encapsuladas com soja (40,68^b) e ervilha (40,62^b), enquanto a amostra com 100% WPI apresentou menor luminosidade (41,32^a). O aumento de L^* no extrato pode estar associado à maior presença de compostos solúveis e à ausência de matriz proteica, enquanto nas cápsulas, a presença das proteínas pode favorecer agregação ou retenção parcial dos pigmentos, modulando a claridade da fração solúvel.

O parâmetro a^* (intensidade do vermelho) foi significativamente maior nas formulações encapsuladas com proteínas (WPI: 7,40^a; ervilha: 7,65^b), enquanto o extrato apresentou valor inferior (5,58^c), indicando que a encapsulação contribuiu para a proteção e liberação controlada de compostos coloridos na fase intestinal. A formulação com soja, por outro lado, apresentou valor significativamente menor de a^* (7,37^d), sugerindo uma possível perda ou transformação de pigmentos durante a digestão, possivelmente por interações específicas com a proteína de soja.

Em b^* (amarelo), o maior valor foi observado para WPI (5,27^a), seguido pelas amostras com ervilha (4,91^b), soja (4,68^c) e extrato (4,24^d). Essa diferença indica uma mudança na tonalidade da cor da fração solúvel, mais pronunciada nas cápsulas com proteína do soro,

refletindo maior estabilidade ou solubilização de pigmentos degradados para tons amarelados, comuns em produtos de degradação de antocianinas em pH neutro.

O *croma (C)**, foi maior nas cápsulas com ervilha (9,09^a) e WPI (9,08^a), seguidas por soja (8,73^b) e extrato (7,01^c). Isso indica que a encapsulação favoreceu a preservação da intensidade cromática no ambiente intestinal, possivelmente pela proteção conferida pelas proteínas às antocianinas ou outros compostos fenólicos.

Por fim, o ângulo de matiz (h)* diferiu entre todas as amostras: o extrato manteve o maior valor (37,21^a), seguido por WPI (35,49^b), ervilha (32,68^c) e soja (32,42^d). A redução progressiva do h* nas cápsulas pode indicar um deslocamento de cor para tons mais azulados ou arroxeados, sugerindo diferentes padrões de liberação e transformação dos compostos fenólicos, influenciados pelo tipo de proteína utilizada.

Esses dados indicam que as proteínas utilizadas como material de parede afetam diretamente as propriedades ópticas da fração solúvel intestinal, refletindo sua eficácia na proteção, liberação e possível transformação dos compostos corantes durante a digestão. O comportamento distinto entre as formulações revela que a escolha da proteína encapsulante pode ser estratégica para otimizar a estabilidade e bioacessibilidade dos pigmentos naturais em sistemas alimentares funcionais.

Ao comparar os resultados das fases gástrica e intestinal, observa-se uma redução significativa da intensidade de cor (C)* das amostras após a digestão completa, especialmente para o extrato não encapsulado. Essa diminuição está associada principalmente às condições fisiológicas da fase intestinal, como o pH próximo à neutralidade e a presença de enzimas pancreáticas e sais biliares, que promovem transformações estruturais e degradação dos compostos fenólicos, em especial as antocianinas. Essas moléculas são altamente instáveis em pH neutro e alcalino, podendo sofrer hidrólise, oxidação ou conversão em formas incolores. Nas amostras encapsuladas, embora também tenha ocorrido perda de intensidade cromática, os valores de C* foram mais preservados, indicando que a encapsulação ofereceu proteção parcial contra as reações de degradação. Dessa forma, a coloração da fração solúvel intestinal pode ser utilizada como indicador indireto da estabilidade e bioacessibilidade dos compostos bioativos frente às condições adversas do trato gastrointestinal.

Em estudo realizado por Seke et al. (2022), a estabilidade e liberação de antocianinas

extraídas da fruta ameixa-de-natal (*Carissa macrocarpa*) microencapsuladas em materiais de parede diversos (alginato de sódio, pectina, goma xantana e mucilagem de psyllium), submetidas à digestão gastrointestinal simulada. As análises colorimétricas foram realizadas diretamente no sobrenadante das fases gástrica e intestinal, utilizando o sistema CIELAB. Os autores observaram que os valores de L^* (luminosidade) aumentaram progressivamente ao longo da digestão, já os valores de a^* (intensidade do vermelho) diminuíram, indicando liberação gradual dos compostos fenólicos da matriz encapsulante para o meio. Na fase gástrica, o aumento de a^* foi associado à maior solubilização de antocianinas em pH ácido, enquanto na fase intestinal a elevação de L^* foi atribuída à degradação parcial dos pigmentos, com possível conversão em produtos de coloração menos intensa, mas ainda detectáveis. Esses dados se associam os resultados observados no presente estudo com extrato da casca de jabuticaba, no qual também se verificou *modulação dos parâmetros L , a , C^* e h^** ao longo das fases gastrointestinais. Reforçando aplicabilidade da análise colorimétrica como ferramenta sensível para avaliar a bioacessibilidade compostos fenólicos, bem como evidencia o papel protetor da microencapsulação em meio às condições adversas do trato gastrointestinal.

As alterações nos parâmetros de cor ao longo da digestão *in vitro* sugerem variações na liberação e estabilidade das antocianinas. Assim, a seguir, é apresentada a quantificação do teor de antocianinas nas fases gástrica e intestinal (Figura 8) e % de bioacessibilidade apresentado pelo Quadro 7, de modo a avaliar sua bioacessibilidade e a eficiência dos diferentes materiais de parede na proteção desses compostos bioativos.

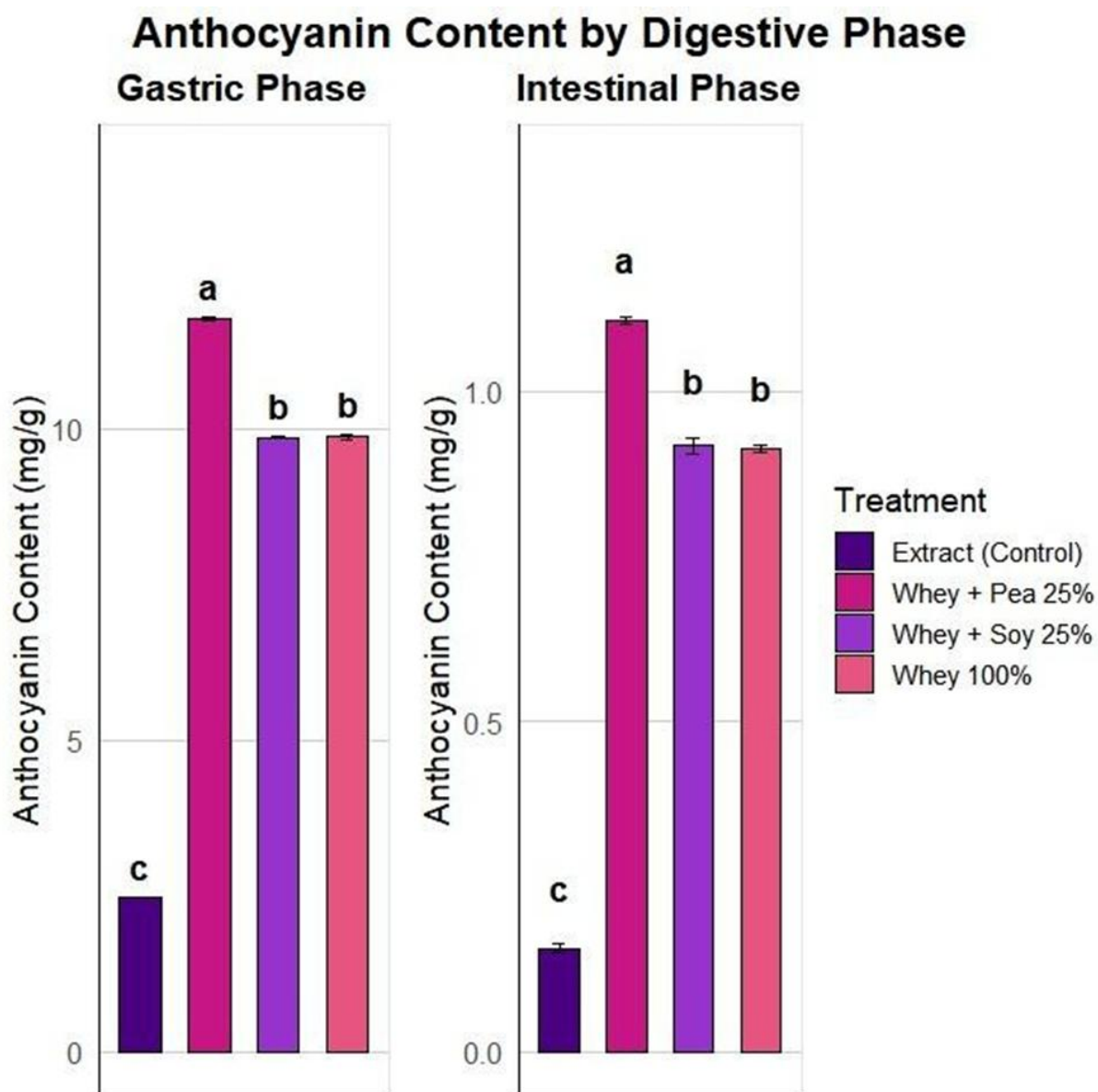


Figura 8: Concentração de antocianinas na fase gástrica e na fase intestinal, respectivamente.

Onde, Anthocyanin Content by Digestive Phase → Teor de Antocianina por Fase Digestiva, Gastric Phase → Fase Gástrica, Intestinal Phase → Fase Intestinal, Anthocyanin Content (mg/g) → Teor de Antocianina (mg/g), Treatment → Tratamento, Extract (Control) → Extrato (Controle), Whey + Pea 25% → Proteínas do Soro de Leite + Ervilha 25% (ou apenas Soro + Ervilha 25%), Whey + Soy 25% → Proteínas Soro de Leite + Soja 25% (ou apenas Soro + Soja 25%), Whey 100% → Proteínas do Soro de Leite 100%.

Valores expressos como média $\pm$ desvio padrão (DP), $n = 4$. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na fase gástrica ou intestinal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quadro 9 - Composição bioativa das micropartículas

Amostra	Antocianinas totais (mg/g) - pré digestão	Antocianinas totais (mg/g) - após digestão	Bioacessibilidade (%)
100% WPI	12,66 ± 0,07 b	0,91 ± 0,00 a	7,20 ± 0,04a
75% WPI e 25% proteína de ervilha	13,80 ± 0,07 a	1,11 ± 0,01 b	8,00 ± 0,05b
75% WPI e 25% proteína de soja	13,71 ± 0,09 a	0,92 ± 0,01a	7,60 ± 0,14a
Extrato (controle)	2,51 ± 0,03 c	0,16 ± 0,01c	6,40 ± 0,24 b

Valores expressos como média ± desvio padrão (DP), n = 4. Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A concentração de antocianinas no final da fase gástrica foi cerca de 10 vezes maior do que no final da fase intestinal, indicando que a maior degradação desses compostos ocorre durante a simulação intestinal. Esse comportamento pode ser atribuído ao pH próximo de 7, menos favorável à estabilidade das antocianinas, ação das enzimas pancreáticas, sais biliares, e maior tempo de exposição à temperatura e agitação do sistema total.

Ainda assim, há presença de antocianinas, a amostra contendo proteína de ervilha ($1,11 \pm 0,01$ mg/g), foi estatisticamente superior às demais ($p < 0,05$). A maior proteção conferida por essa formulação pode estar relacionada à interação entre os compostos bioativos e o material de parede, como sugerido pelas análises de FTIR, que indicaram a formação de ligações químicas relevantes entre os aminoácidos e compostos bioativos, além da maior absorção de antocianinas no interior das micropartículas contendo proteínas de ervilha, o que provavelmente gerou efeito protetor sobre as antocianinas, em exposição a situações adversas da digestão *in vitro*.

Por meio da relação entre os teores de antocianinas antes e após a digestão, foi possível calcular a bioacessibilidade das antocianinas. Os valores variaram de 6,40% (extrato controle) a 8,00% (75% WPI + 25% ervilha), sendo esta última significativamente superior à do extrato e demais materiais de parede ($p < 0,05$), indicando que a encapsulação foi eficaz na proteção dos pigmentos. Todas as amostras microencapsuladas apresentaram valores superiores de (%) de bioacessibilidade em relação ao extrato livre, evidenciando o papel do microencapsulamento na preservação das antocianinas durante a digestão. Esses resultados confirmam a eficiência da técnica de spray drying e a relevância da escolha da matriz proteica, principalmente em formulações que associam WPI com proteínas vegetais, para proteção e liberação gradual de compostos bioativos ao longo do trato gastrointestinal.

Estudo de Kasapoğlu et al., (2024) analisou o efeito da secagem por atomização na estabilidade físico-química e na capacidade antioxidante de lipossomas carregados com extrato de *Rosa pimpinellifolia* conjugados com quitosana ou proteína de soro de leite durante a digestão *in vitro*. No qual a bioacessibilidade dos compostos aumentou significativamente nas amostras encapsuladas com biopolímeros, o que não ocorreu com o extrato livre, indicando a proteção que o microencapsulamento com proteínas gera durante a digestão. Sobre as diferentes taxas de perda de compostos bioativos na fase gástrica e intestinal, Chen et al., (2016) analisou as etapas da digestão *in vitro*. No estudo conduzido por Chen et al. (2023), diversas frutas com alto teor de compostos bioativos foram submetidas à digestão *in vitro* para avaliação da estabilidade e da atividade antioxidante ao longo das fases gástrica e intestinal. Entre as frutas analisadas estavam a uva (*Vitis vinifera*, variedades tinta e preta), a ameixa (*Prunus salicina*, incluindo a variedade san hua), a fruta-do-conde (*Annona squamosa*), a melancia (*Citrullus lanatus*), a lichia (*Litchi chinensis*) e o durião (*Durio zibethinus*). Os autores observaram que a capacidade antioxidante foi significativamente maior na fase gástrica do que na intestinal, comportamento atribuído às variações de pH ao longo do trato gastrointestinal. Segundo os autores, o pH ácido do estômago favorece a reatividade dos antioxidantes e promove maior racemização, enquanto o ambiente mais neutro da fase intestinal (pH entre 6 e 8) reduz a atividade antioxidante. Esse padrão de comportamento corrobora os resultados do presente estudo, que também evidenciou maior degradação das antocianinas na fase intestinal.

Conclusão

O presente estudo evidenciou que o microencapsulamento do extrato de casca de jabuticaba com diferentes matrizes proteicas influencia significativamente a estabilidade, a morfologia e a bioacessibilidade das antocianinas durante a digestão gastrointestinal simulada. As formulações apresentaram absorção de antocianinas pelo processo de secagem por spray dryer, principalmente na amostra com proteína de ervilha. As partículas exibiram tamanho médio inferior a 1150 d.nm e potenciais zeta compatíveis com estabilidade coloidal. As análises de MEV revelaram morfologia típica do processo de secagem por spray dryer, enquanto o FTIR indicou interações entre os compostos fenólicos e as proteínas do material de parede, sugerindo associação química com potencial de proteção.

Durante a digestão, os teores de antocianinas diminuíram progressivamente, especialmente na fase intestinal, confirmando a sensibilidade desses compostos ao pH neutro e à ação enzimática. A maior retenção intestinal foi observada na formulação com 75% WPI + 25% proteína de ervilha ($1,11 \pm 0,01$ mg/g), significativamente superior às demais ($p < 0,05$). A bioacessibilidade variou de 6,40% (extrato livre) a 8,00% (formulação com ervilha), evidenciando o efeito protetor do microencapsulamento. A análise colorimétrica pelo sistema CIELAB confirmou a redução da intensidade de cor ao longo da digestão, especialmente na fase intestinal, refletindo a degradação dos pigmentos.

Esses resultados demonstram que a escolha da matriz proteica impacta diretamente a estabilidade e a liberação dos compostos bioativos, e que o uso de proteínas vegetais, especialmente a ervilha, representa uma estratégia promissora para preservar e direcionar a liberação de antocianinas em matrizes funcionais. A aplicação desse sistema microencapsulado em alimentos e suplementos pode agregar valor nutricional e funcional à jabuticaba, contribuindo para seu aproveitamento tecnológico.

Referências

Abe, Lucile T., et al. “Potential Dietary Sources of Ellagic Acid and Other Antioxidants among Fruits Consumed in Brazil: Jabuticaba (*Myrciaria Jaboticaba* (Vell.) Berg)”. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 92, nº 8, junho de 2012, p. 1679–87. DOI.org Crossref), <https://doi.org/10.1002/jsfa.5531>.

Acuña-Avila, Pedro Estanislao, et al. “Properties of Micro and Nano Casein

Capsules Used to Protect the Active Components: A Review”. *International Journal of Food Properties*, vol. 24, nº 1, janeiro de 2021, p. 1132–47. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1953069>.

Albuquerque, Bianca R., et al. “Jaboticaba Residues (*Myrciaria Jaboticaba* (Vell.) Berg) Are Rich Sources of Valuable Compounds with Bioactive Properties”. *Food Chemistry*, vol. 309, março de 2020, p. 125735. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125735>.

Araújo, J. M. A. Química de Alimentos: Teoria e Prática. (Editora UFV, 2019).

Babault, Nicolas, et al. “Pea Proteins Oral Supplementation Promotes Muscle Thickness Gains during Resistance Training: A Double-Blind, Randomized, Placebo-Controlled Clinical Trial vs. Whey Protein”. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, vol. 12, nº 1, outubro de 2015, p. 3. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1186/s12970-014-0064-5>.

Baldin, Juliana Cristina. *Avaliação do potencial antimicrobiano e antioxidante do extrato de jaboticaba (Myrciaria cauliflora) microencapsulado adicionado em linguiça frescal e mortadela*. 2016. Universidade de São Paulo, Doutorado em Ciências da Engenharia de Alimentos.

DOI.org

(Crossref),

<https://doi.org/10.11606/T.74.2016.tde-03052016-082922>.

Barbosa, L. C. D. A. "Espectroscopia no Infravermelho na caracterização de compostos orgânicos. Viçosa: UFV, 2007. 189 p." *ANEXOS A2. Espectros de RMN de ¹³C das amostras de ácido naftênico A 3*.

Ben-Othman, Sana, et al. “Characterization of Plant Based Spray Dried Powders Using Oil Seed Proteins and Chokeberry Extract from Wine Byproduct”. *Scientific Reports*, vol. 14 nº 1, novembro de 2024, p. 27429. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79223-3>.

Boroski, M. et al. Antioxidantes: Princípios e Métodos Analíticos. 1. ed. [s.l.] Appris, 2015.

Bruschi, M. L., et al. “Gelatin Microparticles Containing Propolis Obtained by Spray-Drying Technique: Preparation and Characterization”. *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 264, nº 1–2, outubro de 2003, p. 45–55. DOI.org (Crossref),

[https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(03\)00386-7](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(03)00386-7).

Cavalcanti, R. N. Extração de antocianinas de resíduo de jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) utilizando líquido pressurizado e fluido supercrítico: caracterização química, avaliação econômica e modelagem matemática. (Unicamp, 2013)

Chen, Guan-Lin, et al. “Nutraceutical Potential and Antioxidant Benefits of Selected Fruit Seeds Subjected to an in Vitro Digestion”. *Journal of Functional Foods*, vol. 20, janeiro de 2016, p. 317–31. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.11.003>.

Chylińska, Monika, et al. “Study on Dietary Fibre by Fourier Transform-Infrared Spectroscopy and Chemometric Methods”. *Food Chemistry*, vol. 196, abril de 2016, p. 114–22. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.029>.

Cristiane Paludo, Michelly. *Extração e determinação da capacidade antioxidante (in vitro) das antocianinas e compostos fenólicos totais da jabuticaba Sabará Myrciaria jabuticaba (Vell.) O. Berg e sua geléia*. 2013. Universidade Estadual de Campinas, Mestra em Ciência de Alimentos. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2013.909058>.

Dantas, Aline Macedo, et al. “Bioaccessibility of Phenolic Compounds in Native and Exotic Frozen Pulps Explored in Brazil Using a Digestion Model Coupled with a imulated Intestinal Barrier”. *Food Chemistry*, vol. 274, fevereiro de 2019, p. 202–14. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.099>.

De Andrade Neves, Nathália, et al. “Identification and Quantification of Phenolic Composition from Different Species of Jabuticaba (*Plinia* Spp.) by HPLC-DAD-ESI/MSn”. *Food Chemistry*, vol. 355, setembro de 2021, p. 129605. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129605>.

Deng, Wei, et al. “Stability of Purple Corn Anthocyanin Encapsulated by Maltodextrin, and Its Combinations with Gum Arabic and Whey Protein Isolate”. *Foods*, vol. 12, nº 12, junho de 2023, p. 2393. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods12122393>.

Díaz-Montes, Elsa. “Wall Materials for Encapsulating Bioactive Compounds via Spray-Drying: A Review”. *Polymers*, vol. 15, nº 12, junho de 2023, p. 2659. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/polym15122659>.

Etxabide, Alaitz, et al. “Whey Protein Films for Sustainable Food Packaging: Effect of Incorporated Ascorbic Acid and Environmental Assessment”. *Polymers*, vol. 15, nº 2, janeiro de 2023, p. 387. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/polym15020387>.

Feitosa, Bruno Fonsêca, et al. “Microencapsulation of Anthocyanins as Natural Dye Extracted from Fruits – A Systematic Review”. *Food Chemistry*, vol. 424, outubro de 2023, p. 136361. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136361>.

Fuleki, Tibor, e F. J. Francis. “Quantitative Methods for Anthocyanins.: 1. Extraction and Determination of Total Anthocyanin in Cranberries.” *Journal of Food Science*, vol. 33, nº 1, janeiro de 1968, p. 72–77. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1968.tb00887.x>.

Galván, Zoila Rosa Nieto, et al. “Rheological Properties of Aqueous Dispersions of Xanthan Gum Containing Different Chloride Salts Are Impacted by Both Sizes and Net Electric Charges of the Cations”. *Food Biophysics*, vol. 13, nº 2, junho de 2018, p. 186–97. *Springer Link*, <https://doi.org/10.1007/s11483-018-9524-9>.

García-Segovia, Purificación, et al. “Beetroot Microencapsulation with Pea Protein Using Spray Drying: Physicochemical, Structural and Functional Properties”. *Applied Sciences*, vol. 11, nº 14, julho de 2021, p. 6658. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/app11146658>.

Gharsallaoui, Adem, et al. “Applications of Spray-Drying in Microencapsulation of Food Ingredients: An Overview”. *Food Research International*, vol. 40, nº 9, novembro de 2007, p. 1107–21. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>.

Kasapoğlu, Kadriye Nur, et al. “Effect of Spray Drying on Physicochemical Stability and Antioxidant Capacity of Rosa Pimpinellifolia Fruit Extract-Loaded Liposomes Conjugated with Chitosan or Whey Protein During In Vitro Digestion”. *Food and Bioprocess Technology*, vol. 17, nº 10, outubro de 2024, p. 3162–76. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03317-z>.

Kieserling, Helena, et al. “Protein–Phenolic Interactions and Reactions: Discrepancies, Challenges, and Opportunities”. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 23, nº 5, setembro de 2024, p. e70015. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70015>.

Leite-Legatti, Alice Vieira, et al. “Jaboticaba Peel: Antioxidant Compounds,

Antiproliferative and Antimutagenic Activities”. *Food Research International*, vol. 49, nº 1, novembro de 2012, p. 596–603. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.044>.

Li, Jia, et al. “A Review of the Interaction between Anthocyanins and Proteins”. *Food Science and Technology International*, vol. 27, nº 5, julho de 2021, p. 470–82. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1177/1082013220962613>.

Mccabe, W., et al.. Unit Operations of Chemical Engineering. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

Minekus, M., et al. “A Standardised Static in Vitro Digestion Method Suitable for Food – an International Consensus”. *Food & Function*, vol. 5, nº 6, maio de 2014, p. 1113–24. *pubs.rsc.org*, <https://doi.org/10.1039/C3FO60702J>.

Mohammadalinejad, Samira, e Marcin Andrzej Kurek. “Microencapsulation of Anthocyanins—Critical Review of Techniques and Wall Materials”. *Applied Sciences*, vol. 11, nº 9, abril de 2021, p. 3936. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.3390/app11093936>.

Nascimento, Amanda Priscila Silva, et al. “Enhancing Antioxidant Retention through Varied Wall Material Combinations in Grape Spray Drying and Storage”. *Antioxidants*, vol. 12, nº 9, setembro de 2023, p. 1745. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.3390/antiox12091745>.

Nishinari, K., et al. “Soy Proteins: A Review on Composition, Aggregation and Emulsification”. *Food Hydrocolloids*, vol. 39, agosto de 2014, p. 301–18. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.01.013>.

O’Mahony, J. A., e P. F. Fox. “Milk: An Overview”. *Milk Proteins*, Elsevier, 2014, p. 19–73. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405171-3.00002-7>.

Ozkan, Gulay, et al. “A Review of Microencapsulation Methods for Food Antioxidants: Principles, Advantages, Drawbacks and Applications”. *Food Chemistry*, vol. 272, janeiro de 2019, p. 494–506. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>.

Paes, Francisco Elvino Rodrigues. “Microencapsulamento de antocianinas de Jamelão (*Syzygium cumini* L.).” (2021).

Pan, Li-Hua, et al. “Microencapsulation of Blueberry Anthocyanins by Spray Drying

with Soy Protein Isolates/High Methyl Pectin Combination: Physicochemical Properties, Release Behavior in Vitro and Storage Stability”. *Food Chemistry*, vol. 395, novembro de 2022, p. 133626. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133626>.

Pech-Canul, Angel De La Cruz, et al. “A Brief Review of Edible Coating Materials for the Microencapsulation of Probiotics”. *Coatings*, vol. 10, nº 3, fevereiro de 2020, p. 197. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.3390/coatings10030197>.

Queirós, Rui, et al. “High-Pressure Effects on Selected Properties of Pea and Soy Protein Isolates”. *Applied Sciences*, vol. 13, nº 4, fevereiro de 2023, p. 2359. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.3390/app13042359>.

Re, Roberta, et al. “Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay”. *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 26, nº 9–10, maio de 1999, p. 1231–37. *DOI.org* (*Crossref*), [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).

Resende, Laís M., et al. “Characterization of Jabuticaba (*Plinia Cauliflora*) Peel Flours and Prediction of Compounds by FTIR Analysis”. *LWT*, vol. 133, novembro de 2020, p. 110135. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110135>.

Rigolon, Thaís Caroline Buttow. Caracterização, estabilidade e interações químicas de microcápsulas de antocianinas purificadas de açaí (*Euterpe edulis* Mart.) obtidas por spray dryer utilizando polissacarídeos como material de parede. 2021.

Rigolon, Thaís Caroline Buttow, et al. “Exploring Anthocyanins-Polysaccharide Synergies in Microcapsule Wall Materials via Spray Drying: Interaction Characterization and Evaluation of Particle Stability”. *Measurement: Food*, vol. 13, março de 2024, p. 100126. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.meafuo.2023.100126>.

Robert, Paz, et al. “Encapsulation of Polyphenols and Anthocyanins from Pomegranate (*Punica Granatum*) by Spray Drying: Encapsulation of Polyphenols and Anthocyanins”. *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 45, nº 7, junho de 2010, p. 1386–94. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02270.x>.

Rocha, Juliana De Cássia Gomes, et al. “Microencapsulation by Atomization of the Mixture of Phenolic Extracts”. *Powder Technology*, vol. 343, fevereiro de 2019, p. 317–25. *DOI.org* (*Crossref*), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.040>.

Rocha, Juliana de Cássia Gomes, et al. “Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Jussara (*Euterpe Edulis* M.) and Blueberry (*Vaccinium Myrtillus*) Fruits”. *Food Science and Technology*, vol. 38, maio de 2017, p. 45–53. *SciELO*, <https://doi.org/10.1590/1678-457X.36316>.

Sant’Anna, Voltaire, et al. “Tracking Bioactive Compounds with Colour Changes in Foods – A Review”. *Dyes and Pigments*, vol. 98, n° 3, setembro de 2013, p. 601–08. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.04.011>.

Seke, Faith, et al. “In Vitro Release of Anthocyanins from Microencapsulated Natal Plum (*Carissa Macrocarpa*) Phenolic Extract in Alginate/Psyllium Mucilage Beads”. *Foods*, vol. 11, n° 17, agosto de 2022, p. 2550. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/foods11172550>.

Shanthakumar, Parvathy, et al. “The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry”. *Molecules*, vol. 27, n° 16, agosto de 2022, p. 5354. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>.

Silva, K. S., et al. “Physicochemical and Microstructural Properties of Whey Protein Isolate-Based Films with Addition of Pectin”. *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 16, junho de 2018, p. 122–28. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.03.005>.

Silva, Pollyanna Ibrahim, et al. “Parameter Optimization for Spray-Drying Microencapsulation of Jaboticaba (*Myrciaria Jaboticaba*) Peel Extracts Using Simultaneous Analysis of Responses”. *Journal of Food Engineering*, vol. 117, n° 4, agosto de 2013, p. 538–44. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.039>.

Singleton, V. L., e Joseph A. Rossi. “Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents”. *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 16, n° 3, 1965, p. 144–58. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>.

Smeriglio, Antonella, et al. “Chemistry, Pharmacology and Health Benefits of Anthocyanins”. *Phytotherapy Research*, vol. 30, n° 8, agosto de 2016, p. 1265–86. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1002/ptr.5642>.

Stringheta, Paulo Cesar, e Pedro Augusto Vieira De Freitas. *Corantes Naturais: da*

diversidade da natureza as aplicações e benefícios. Organizado por Paulo Cesar Stringheta e Pedro Augusto Vieira De Freitas, 1º ed, Even3 Publicações, 2021. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.29327/540979>.

Teimouri, Shahla, et al. “Diffusional Characteristics of Food Protein-Based Materials as Nutraceutical Delivery Systems: A Review”. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 122, abril de 2022, p. 201–10. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.025>.

Vergara, Cristina, et al. “Microencapsulation of Anthocyanin Extracted from Purple Flesh Cultivated Potatoes by Spray Drying and Its Effects on In Vitro Gastrointestinal Digestion”. *Molecules*, vol. 25, nº 3, fevereiro de 2020, p. 722. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/molecules25030722>.

Viana, Kéllen Wanessa Coutinho, et al. “From Peel to Health: Jaboticaba’s Phenolics Counteract Oxidative Stress and Liver Fat Buildup”. *Food, Nutrition and Health*, vol. 2, nº 1, fevereiro de 2025, p. 5. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1007/s44403-025-00015-2>.

Xue, Hongkun, et al. “Factors Affecting the Stability of Anthocyanins and Strategies for Improving Their Stability: A Review”. *Food Chemistry: X*, vol. 24, dezembro de 2024, p. 101883. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101883>.

Yan, Cuie, e Wei Zhang. “Coacervation Processes”. *Microencapsulation in the Food Industry*, Elsevier, 2014, p. 125–37. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404568-2.00012-1>.

Zhao, Mengyue, et al. “Effects of Different Proteins and Maltodextrin Combinations as Wall Material on the Characteristics of Cornus Officinalis Flavonoids Microcapsules”. *Frontiers in Nutrition*, vol. 9, setembro de 2022. *Frontiers*, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1007863>.