

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Ciências e Letras - Campus de Assis

MARIANA GABRIÉLY CANDIDO BONFIM

**O potencial do fucoïdano extraído de algas pardas:
aplicação em microencapsulação de antocianinas**

MARIANA GABRIÉLY CANDIDO BONFIM

**O potencial do fucoidano extraído de algas pardas:
aplicação em microencapsulação de antocianinas**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Assis, para a obtenção do título de Mestra em Biociências (Área de Concentração: Caracterização e Aplicação da Diversidade Biológica)

Orientador(a): Dra. Ivanise Guilherme Branco

Bolsista: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

B713p

Bonfim, Mariana Gabriély Candido

O potencial do fucoidano extraído de algas pardas : aplicação em microencapsulação de antocianinas / Mariana Gabriély Candido

Bonfim. -- Assis, 2026

68 f. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Letras, Assis

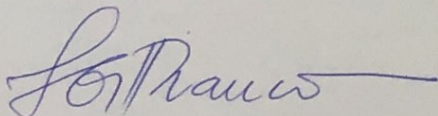
Orientadora: Profa. Dra. Ivanise Guilherme Branco

1. Polissacarídeos. 2. Algas marinhas. 3. Microencapsulação. 4.
Antocianinas. I. Título.



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARIANA GABRIÉLY CANDIDO BONFIM, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCIÊNCIAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E LETRAS - CÂMPUS DE ASSIS.

Aos 11 de junho de 2026, às 14h, no(a) Sala da Congregação e sala virtual: meet.google.com/jtb-uvnz-btt, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARIANA GABRIÉLY CANDIDO BONFIM, intitulada "O potencial do fucoidano extraído de algas pardas: aplicação em microencapsulação de antocianinas". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. IVANISE GUILHERME BRANCO (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) UNESP / Câmpus de Assis - FCLAs, Profa. Dra. CASSIA ROBERTA MALACRIDA MAYER (Participação Presencial) do(a) UNESP / Câmpus de Assis - FCLAs, Profa. Dra. ELIANA JANET SANJINEZ ARGANDOÑA (Participação Virtual) do(a) Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Profa. Dra. IVANISE GUILHERME BRANCO

AGRADECIMENTOS

À Dra. Ivanise Guilherme Branco, pela orientação, apoio e dedicação durante toda pesquisa.

À Dra. Cássia Roberta Malacrida Mayer, pelo empréstimo de equipamentos do laboratório.

À Dra. Juliana Pomari, por toda troca de conhecimento e suporte prestado ao longo da pesquisa.

À minha família, pelo suporte e apoio incondicional durante todos os anos da graduação e da pós-graduação.

Às minhas amigadas Laura (Cheetos), Luisa, Amanda, Pilar e Diego, pela companhia, risada e momentos leves.

Aos colegas de laboratório Camila, Natalie, Arthur, João Marcos, Ashka, Elisa, Guilherme e Mike pelo apoio e companhia prestados durante a pesquisa.

Aos técnicos de laboratório Allan e Bruno por toda prestatividade durante esses anos.

À banca de qualificação e defesa.

Aos laboratórios da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP): Laboratório de Biotecnologia Industrial e laboratório associado (IPBEN), Laboratório de Nanobiotecnologia, Laboratório de Engenharia e Química de Alimentos (LEQuA) e ao laboratório da Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP pelos equipamentos utilizados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

BONFIM, Mariana Gabriély Candido. **O potencial do fucoidano extraído de algas pardas: aplicação em microencapsulação de antocianinas.** 2026. 68f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Biociências – Universidade Estadual Paulista (UNESP)), Faculdade de Ciências e Letras, Assis, 2026.

RESUMO

O fucoidano é um polissacarídeo sulfatado aniônico obtido de algas pardas (*Sargassum cymosum* C. Agardh), constituído predominantemente por L-fucose, com diversas atividades biológicas, incluindo ação anticancerígena. Outro polissacarídeo aniônico de algas pardas é o alginato de sódio, formado por blocos de β -D-manuronato (M) e α -L-guluronato (G) ligados por ligações (1,4), amplamente utilizado devido à sua biocompatibilidade e capacidade de gelificação na presença de Ca^{2+} . As antocianinas são moléculas catiônicas com propriedades antioxidantes, porém instáveis frente ao pH, oxigênio e luz, tornando a encapsulação uma estratégia para sua preservação. Este estudo caracterizou e encapsulou antocianinas extraídas de amora-preta (*Rubus* spp.) utilizando alginato de sódio comercial e fucoidano extraído de *Sargassum cymosum* C. Agardh, associados à gelificação iônica externa e liofilização. Após a extração de antocianinas, a solução foi concentrada e liofilizada, sendo caracterizada quanto ao pH, acidez, antocianinas totais, compostos fenólicos, sólidos solúveis e umidade. O teor de antocianinas totais foi preservado após a liofilização (1461,15 mg cianidina-3-glicosídeo (C3G)/100 g b.u.). A solução concentrada exibiu alto teor de antocianinas totais (1248,68 mg cianidina-3-glicosídeo (C3G)/100 g b.s.), compostos fenólicos (757,13 mg ácido gálico/100 g b.s.), umidade de 95,56%, acidez de 1,67 % e concentração de sólidos solúveis de 5,70 °Brix. Foram preparadas formulações contendo fucoidano (0,25%, 0,50%, 0,75% e 1%), alginato (2%) e antocianina liofilizada (1%). As formulações foram caracterizadas por potencial zeta, diâmetro hidrodinâmico, índice de polidispersão (PDI), pH e reologia. A formulação com 0,50% de fucoidano apresentou potencial zeta de -51,44 mV, PDI de 0,4 e diâmetro hidrodinâmico de 4,5 μm , que indicam um sistema coloidal estável. Todas as formulações apresentaram comportamento pseudoplástico ($n < 1$), com aumento do índice de consistência e redução do índice de comportamento do fluido conforme o aumento da concentração de fucoidano. As esferas foram avaliadas quanto ao intumescimento, solubilidade, eficiência de encapsulação e carregamento,

microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de infravermelho por transformada de fourier com refletância total atenuada (FTIR-ATR). As formulações de fucoidano 0,5%, 0,75% e 1% apresentaram as maiores taxas de intumescimento, sendo 58,29% (0,5%), 60,46% (0,75%) e 61,12% (1%). Os menores valores de solubilidade também foram obtidos para essas concentrações de fucoidano, correspondendo a 56,09% (0,5%), 39,96% (0,75%) e 39,02% (1%), indicando elevada resistência e reticulação. A eficiência de encapsulação e carregamento foi de 68,86% – 29,20% (0,5%), 70,86% – 30,50% (0,75%) e 71,20% – 41,04% (1%). A microscopia eletrônica de varredura revelou menor deformação superficial nas esferas com 0,5% – 0,75% de fucoidano, enquanto a espectroscopia no infravermelho confirmou os principais grupos funcionais de alginato, fucoidano e antocianinas, além de evidenciar interações intermoleculares. A encapsulação por gelificação iônica externa associada à liofilização mostrou-se uma estratégia promissora para utilização do fucoidano como agente encapsulante de antocianinas, com potencial aplicação nas áreas alimentícia e farmacêutica.

.

Palavras-chave: Algas pardas. Fucoidano. Alginato. Antocianinas. Microencapsulação.

BONFIM, Mariana Gabriély Candido. **The potential of fucoidan extracted from brown algae: application in anthocyanin microencapsulation.** 2026. 68p. Dissertation (Academic Master's in Biosciences – São Paulo State University (UNESP)), School of Sciences and Letters, Assis, 2026.

ABSTRACT

Fucoidan is an anionic sulfated polysaccharide obtained from brown algae (*Sargassum cymosum* C. Agardh), predominantly composed of L-fucose, with several biological activities, including anticancer activity. Another anionic polysaccharide from brown algae is sodium alginate, composed of blocks of β -D-mannuronate (M) and α -L-guluronate (G) linked by (1,4) glycosidic bonds, widely used due to its biocompatibility and gel-forming ability in the presence of Ca^{2+} . Anthocyanins are cationic molecules with antioxidant properties; however, they are unstable when exposed to pH, oxygen, and light, making encapsulation a strategy for their preservation. This study characterized and encapsulated anthocyanins extracted from blackberry (*Rubus* spp.) using commercial sodium alginate and fucoidan extracted from *Sargassum cymosum* C. Agardh, combined with external ionic gelation and freeze-drying. After anthocyanin extraction, the solution was concentrated and freeze-dried, and characterized in terms of pH, acidity, total anthocyanins, phenolic compounds, soluble solids, and moisture. Total anthocyanin content was preserved after freeze-drying (1461.15 mg cyanidin-3-glucoside (C3G)/100 g w.w). The concentrated solution exhibited a high total anthocyanin content (1248.68 mg cyanidin-3-glucoside (C3G)/100 g d.w.), phenolic compounds (757.13 mg gallic acid/100 g d.w.), 95.56% moisture, 1.67% acidity and 5.70 °Brix soluble solids concentration. Formulations containing fucoidan (0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1%), alginate (2%), and freeze-dried anthocyanin (1%) were prepared. The formulations were characterized by zeta potential, hydrodynamic diameter, polydispersity index (PDI), pH, and rheology. The formulation containing 0.50% fucoidan exhibited a zeta potential of -51.44 mV, PDI of 0.4, and hydrodynamic diameter of $4.5\text{ }\mu\text{m}$, which indicate a stable colloidal system. All formulations exhibited pseudoplastic behavior ($n < 1$), with an increase in the consistency index and a reduction in the flow behavior index as the fucoidan concentration increased. The spheres were evaluated for swelling, solubility, encapsulation efficiency and loading capacity, scanning electron microscopy (SEM), and Fourier transform infrared

spectroscopy with attenuated total reflectance (FTIR-ATR). The formulations containing 0.5%, 0.75%, and 1% fucoidan exhibited the highest swelling rates, corresponding to 58.29% (0.5%), 60.46% (0.75%), and 61.12% (1%). The lowest solubility values were also obtained for these fucoidan concentrations, corresponding to 56.09% (0.5%), 39.96% (0.75%), and 39.02% (1%), indicating high resistance and crosslinking. Encapsulation efficiency and loading capacity were 68.86% – 29.20% (0.5%), 70.86% – 30.50% (0.75%), and 71.20% – 41.04% (1%). Scanning electron microscopy revealed lower surface deformation in spheres containing 0.5% – 0.75% fucoidan, while infrared spectroscopy confirmed the main functional groups of alginate, fucoidan, and anthocyanins, in addition to evidencing intermolecular interactions. Encapsulation by external ionic gelation combined with freeze-drying proved to be a promising strategy for the use of fucoidan as an encapsulating agent for anthocyanins, with potential applications in the food and pharmaceutical fields.

Keywords: Brown algae. Fucoidan. Alginate. Anthocyanins. Microencapsulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Fucoidano	16
3.1.1 Alginato de sódio	17
3.1.2 Encapsulação.....	18
3.1.3 Gelificação Iônica Externa e Liofilização.....	20
3.1.4 Antocianinas.....	21
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1 Material	23
4.2 Extração do fucoidano.....	23
4.3 Extração e concentração de antocianinas de polpa de amora	24
4.4 Formulações de hidrogéis a base de fucoidano, alginato de sódio e extrato de antocianinas.....	25
4.5 Produção das esferas úmidas e liofilizadas	26
4.6 Caracterização do extrato de antocianinas.....	26
4.6.1 pH e sólidos solúveis.....	26
4.6.2 Umidade	26
4.6.3 Acidez titulável	26
4.6.4 Antocianinas totais	27
4.6.5 Fenólicos totais	27
4.7 Caracterização das formulações de alginato de sódio, fucoidano e extrato de antocianinas.....	28
4.7.1 Análise Reológica.....	28

4.7.2 Potencial Zeta (PZ), índice de polidispersão (PDI) e diâmetro hidrodinâmico (DH)	28
4.8 Análises das esferas	28
4.8.1 Eficiência de encapsulação e carregamento	28
4.8.2 Solubilidade.....	29
4.8.3 Intumescimento.....	29
4.8.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier com Refletância Total Atenuada (FTIR-ATR)	30
4.8.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	30
4.9 Análise estatística.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1 Caracterização do extrato de antocianinas de polpa de amora	32
5.2 Caracterização das formulações de alginato de sódio, fucoidano e extrato de antocianinas.....	33
5.2.1 Análise Reológica.....	33
5.2.2 Potencial Zeta (PZ), diâmetro hidrodinâmico (DH), índice de polidispersão (PDI) e pH das formulações com diferentes concentrações de fucoidano	35
5.2.3 Avaliação da aparência visual das esferas	38
5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	40
5.2.5 Eficiência de encapsulação e carregamento	42
5.2.6 Solubilidade.....	43
5.2.7 Intumescimento.....	44
5.2.8 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier com Refletância Total Atenuada (FTIR-ATR)	45
6. CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O fucoidano é um polissacarídeo sulfatado obtido de algas pardas, o qual apresenta boas funções antibacterianas, antioxidantes e imunomoduladoras atribuídas aos seus grupos sulfato. Comparados a outros polissacarídeos marinhos, como o alginato, os polissacarídeos de algas marinhas apresentam melhor atividade biológica (Lu *et al.*, 2022). A estrutura química do fucoidano contém unidades repetidas de L-fucose na cadeia principal, com sulfatos e outros monossacarídeos como grupos laterais. Este polissacarídeo negativamente carregado (aniônico) tem sido utilizado no desenvolvimento de hidrogéis devido à sua capacidade de estabilização com moléculas positivamente carregadas (Ramos-de-la-peña *et al.*, 2022).

Também extraído de algas pardas, o alginato de sódio é outro polissacarídeo aniônico que possui biocompatibilidade, biodegradabilidade e renovabilidade excepcionais, devido à sua estrutura rica em grupos hidroxila e carboxila (Zhang *et al.*, 2023). Esses grupos funcionais interagem com cátions metálicos divalentes, como o Ca^{2+} , permitindo a formação de esferas de hidrogel (Sriamornsak *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2022). A combinação de polissacarídeos possibilita o desenvolvimento de esferas de hidrogel mais eficientes, exibindo estruturas desejáveis para maiores capacidades de encapsulação e carregamento (Yan *et al.*, 2025), o que permite sua utilização como agentes encapsulantes de compostos bioativos como as antocianinas.

As antocianinas são pigmentos hidrossolúveis responsáveis pelas colorações rosa, vermelha, roxa e azul, dependendo do pH do meio (Tarone *et al.*, 2020). Esses compostos fenólicos estão associados à elevada atividade antioxidante e têm demonstrado propriedades anticancerígenas, anti-inflamatórias e neuroprotetoras (Sariburun *et al.*, 2010). As antocianinas existem principalmente na forma catiônica (positivamente carregada) em pH ácido (Xue *et al.*, 2024). O núcleo principal das antocianinas é um cátion 2-fenilbenzopirano, que se liga a anéis aromáticos por meio de uma ligação $\text{C}=\text{C}$, formando uma estrutura esquelética altamente conjugada C6-C3-C6 (Junior *et al.*, 2023).

No entanto, a principal dificuldade na aplicação das antocianinas está associada à sua baixa estabilidade em condições adversas, como exposição ao oxigênio, temperatura, variações de pH e luz, fatores que influenciam as

características físico-químicas do produto final (Mohammadalinejhad; Kurek, 2021). Neste contexto, a encapsulação tem sido amplamente empregada para proteger substâncias funcionais contra a degradação, promovendo maior estabilidade física, liberação controlada e melhor armazenamento das antocianinas (Xue *et al.*, 2024). Além disso, a encapsulação pode favorecer a biodisponibilidade desses compostos no organismo, o que justifica a aplicação de métodos como a gelificação iônica externa e a liofilização (*freeze-drying*) para a preservação de compostos hidrossolúveis e termossensíveis (Mohammadalinejhad; Kurek, 2021; Naliyadhara; Trujillo, 2025).

Dentre os sistemas de encapsulação, as formulações à base de fucoïdano destacam-se por serem comestíveis, facilmente modificáveis, de baixo custo e ecologicamente corretas, sendo promissoras para aplicações voltadas à estabilidade e à biodisponibilidade de antocianinas (Luo *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2023; El-Sheekh *et al.*, 2026). No entanto, a aplicação do fucoïdano enfrenta limitações quanto ao seu rendimento de extração e propriedades reológicas, visto que, nas algas pardas, ele representa aproximadamente de 5% a 20% do peso seco da alga e é um polissacarídeo não gelificante (Wang *et al.*, 2021; El-Sheekh *et al.*, 2026). Nesse contexto, o alginato de sódio, têm sido amplamente empregado devido às suas propriedades de reticulação, aumento de viscosidade e formação de gel, bem como atividades biológicas (Zhang; Li, 2020; Dong *et al.*, 2021; Ayrapetyan *et al.*, 2021; El-Sheekh *et al.*, 2026). O diferencial deste estudo está na utilização do fucoïdano extraído de *Sargassum cymosum* C Agardh, que atua simultaneamente como material de parede e como molécula funcional.

Este trabalho hipotetiza que a combinação do alginato de sódio com o fucoïdano promove a formação de uma rede polimérica mais estável, aumentando a eficiência de encapsulamento e carregamento das antocianinas devido às interações eletrostáticas entre os grupos sulfato e carboxílicos, negativamente carregados do fucoïdano e alginato, com os grupos funcionais positivamente carregados das antocianinas. Assim, neste estudo, antocianinas de amora-preta foram encapsuladas utilizando os polissacarídeos fucoïdano extraído de *Sargassum cymosum* C Agardh e alginato de sódio como agentes encapsulantes. Foram preparadas formulações coloidais com diferentes concentrações de fucoïdano e concentrações fixas de alginato e antocianinas, as quais serão caracterizadas quanto às propriedades físicas (comportamento reológico, potencial zeta, diâmetro hidrodinâmico, índice de polidispersão (PDI)) além de propriedades químicas (pH) e teor de antocianinas totais.

As esferas úmidas foram avaliadas quanto a eficiência de encapsulamento, enquanto as esferas liofilizadas foram analisadas em relação à eficiência de carregamento, intumescimento, solubilidade e morfologia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Encapsular antocianinas extraídas da amora-preta (*Rubus* spp.) por gelificação iônica externa, utilizando fucoidano e alginato de sódio como materiais de parede e caracterizar suas propriedades químicas, físicas e estruturais.

2.2 Objetivos Específicos

- Extrair fucoidano da alga parda (*Sargassum cymosum* C. Agardh);
- Extrair e caracterizar o extrato da amora-preta *Rubus* spp;
- Desenvolver formulações com diferentes concentrações de fucoidano, alginato e antocianinas e caracterizá-las em relação ao pH, comportamento reológico, potencial zeta, tamanho hidrodinâmico, índice de polidispersão;
- Produzir esferas com diferentes concentrações de fucoidano, alginato e antocianinas encapsuladas por gelificação iônica externa;
- Caracterizar a esfera úmida (eficiência de encapsulação) e a liofilizada por meio de análises químicas e estruturais (eficiência de carregamento, solubilidade, intumescimento, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia no infravermelho na região média).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fucoïdano

O fucoïdano é um polissacarídeo aniônico extraído de algas pardas, apresenta ausência de efeitos tóxicos e tem uma estrutura constituída principalmente por resíduos de L-fucose, D-xilose, D-manose, D-galactose, L-ramnose, D-arabinose, D-glicose, ácido D-glucurônico, além de grupos sulfato e acetil (Torres *et al.*, 2020; Paiboon, 2023; Almeida-Lima, 2010) (Figura 1).

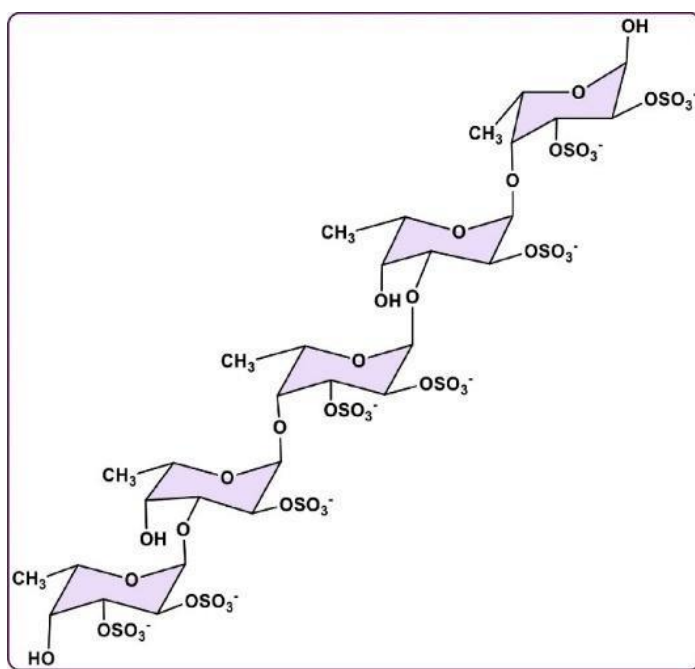


Figura 1 – Estrutura química do fucoïdano (Ramos-de-la-peña *et al.*, 2022)

Por ser carregado negativamente, esse polissacarídeo sulfatado pode se ligar com moléculas carregadas positivamente, preparando partículas adequadas para a encapsulação de antocianinas (Lee *et al.*, 2020). Além disso, estudos têm mostrado que o fucoïdano atua como um antioxidante natural, agente antitumoral e anti trombótico (Yua *et al.*, 2015). Ettoumi *et al.* (2024) desenvolveram uma formulação de hidrogel combinando diferentes proporções de fucoïdano e quitosana para encapsular nanolipossomas carregados com catequina/juglona e observaram que o comportamento reológico do hidrogel exibiu viscoelasticidade aprimorada, estrutura de rede estável, comportamento pseudoplástico e responsividade ao pH, demonstrado pelo comportamento do hidrogel no ambiente gastrointestinal simulado, indicando uma aplicação promissora para produtos com polifenóis e resistência

prolongada a danos mecânicos. Barbosa et al. (2019) prepararam partículas de fucoidano/quitosana (F/C) em diferentes concentrações de fucoidano, para encapsulação de quercitina e observaram que o teor de quercitina variou de 110 ± 3 a $335 \pm 4 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ com o aumento da concentração de fucoidano. As partículas de fucoidano e quitosana carregadas com quercitina formuladas nas proporções 3F/1C e 5F/1C apresentaram diâmetro hidrodinâmico na faixa de 300-400 nm, potencial zeta em torno de -30 mV e índice de polidispersão de 0,1 e 0,2 para formulação de 3F/1C e 5F/C, respectivamente. Além disso, as partículas preparadas com concentrações elevadas de fucoidano apresentaram aumento do potencial zeta e inchaço em função do aumento do pH, sendo consideradas adequadas para administração oral. Neste contexto, polissacarídeos com alta densidade de carga e biocompatibilidade, como o fucoidano e alginato de sódio, têm potencial como agentes estabilizantes de formulações contendo antocianinas (Huang et al., 2025).

3.1.1 Alginato de sódio

O alginato de sódio é um polissacarídeo aniônico derivado de algas pardas e composto por resíduos de ácido β -D-manurônico (M) e α -L-gulurônico (G) ligados por ligações (1 – 4) (Figura 2A) (Paiboon et al., 2023). É um dos polissacarídeos mais estudados para a fabricação de produtos de valor agregado devido às suas propriedades gelificantes e responsivas ao pH (Pawar; Edgar, 2012). Além disso, o alginato de sódio forma uma estrutura de gel por interação eletrostática entre cátions metálicos e ácidos gulurônicos, criando uma estrutura de "caixa de ovos" (Figura 2B), possibilitando a sua aplicação como um carreador (Li et al., 2021).

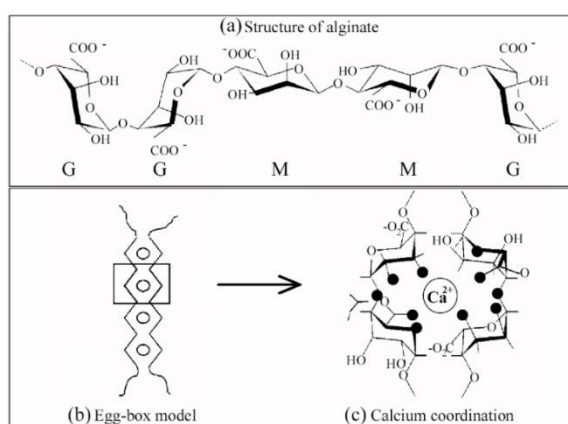


Figura 2 – Estrutura química do alginato (a) e do gel de alginato (b) (Hurtado et al., 2022)

Diferentes graus de viscosidade do alginato são empregados em sistemas de encapsulação, os quais influenciam diretamente a formação de partículas e a eficiência de retenção dos compostos encapsulados (Olivares; Silva, 2019). O alginato de média viscosidade tem sido amplamente utilizado por apresentar fácil aplicação e formação de redes poliméricas estáveis por gelificação iônica com íons Ca^{2+} , sendo aplicado na encapsulação de fármacos e compostos bioativos (Majimbi *et al.*, 2021).

Kjesbu *et al.* (2026) desenvolveram um hidrogel de alginato e fucoídano para investigar a resistência à compressão máxima, estabilidade e vazamento do hidrogel. Foi observado que a incorporação de fucoídano no hidrogel de alginato alterou a mecânica de deformação do hidrogel, mantendo a estabilidade, possibilitando o desenvolvimento de hidrogéis altamente compressíveis. Mohammadlinejhad *et al.* (2023) encapsularam antocianinas em hidrogéis de alginato para produção de esferas, visando investigar sua aplicação em embalagens inteligentes. O estudo indicou que a meia-vida da cianidina-3-glicosídeo foi maior e apresentaram menor probabilidade de sofrer alterações de cor. Além disso, as esferas produzidas com o hidrogel de alginato carregado com antocianinas exibiram maior sensibilidade a concentrações mais baixas de amônia, tornando-as adequadas para detecção precoce de deterioração para produtos. Diversas estratégias vêm sendo aliadas à encapsulação de antocianinas, sendo os métodos físico-químicos os mais aplicados (Mohammadlinejhad; Kurek, 2021).

3.1.2 Encapsulação

Encapsular antocianinas tem se tornado uma questão de interesse para aplicações futuras deste composto fenólico em alimentos, medicamentos e outras áreas (Fraisse *et al.*, 2020). Sistemas de liberação são alternativas importantes para melhorar efetivamente a estabilidade e a biodisponibilidade das antocianinas, consistindo no processo de adsorção, incorporação ou conexão direta de substâncias funcionais a um transportador (Xue *et al.*, 2024).

A encapsulação é uma das estratégias eficazes para preservar a estabilidade de substâncias funcionais, desempenhando uma importante função nos sistemas de liberação de antocianinas (Zhang *et al.*, 2020). A encapsulação refere-se à retenção de substâncias em esferas seladas, em forma sólida, líquida ou gasosa, potencializando sua atividade biológica, desempenho e estrutura, sem serem afetadas por fatores ambientais externos (Xue *et al.*, 2024). Em aplicações, a encapsulação

apresenta vantagens como melhoria de estabilidade, liberação sustentada ou controlada, mascaramento de odor e o direcionamento do fármaco para área alvo (Rocha *et al.*, 2019). Estudos crescentes têm mostrado que proteínas, polissacarídeos e lipídeos são utilizados como carreadores para preparar microesferas, nanoesferas e lipossomas (Ko, Lee, Sop Nam e Gyu Lee, 2017; Ma, Cheng *et al.*, 2022). Os polissacarídeos apresentam excelente biocompatibilidade e não são tóxicos, podendo ser utilizados para liberação de substâncias funcionais devido seu valor prático na melhoria da estabilidade dessas substâncias (Xue *et al.*, 2024).

Os sistemas de encapsulação de antocianinas mais comuns incluem polissacarídeo-antocianina (Ma, Cheng *et al.*, 2022). Lee *et al.*, (2020) prepararam nanocápsulas de antocianinas com fucoidano (Figura 3) e observaram que as ligações iônicas e interações atrativas das antocianinas com o polissacarídeo aumentaram a absorção de antocianinas pelo organismo e promoveram satisfatória estabilidade química no plasma, potencializando a aplicação do fucoidano e antocianinas em alimentos funcionais e na indústria farmacêutica, visando a prevenção e o tratamento contra o câncer. Huang *et al.*, (2025) prepararam emulsões com fucoidano, antocianinas e alginato de sódio e observaram ligações cruzadas, por pontes de hidrogênio, entre os polissacarídeos e antocianinas, estabelecendo uma rede tridimensional que estabilizou efetivamente a fase oleosa da emulsão, limitando seu acesso às enzimas digestivas e, conseqüentemente, retardando a liberação de ácidos graxos livres.

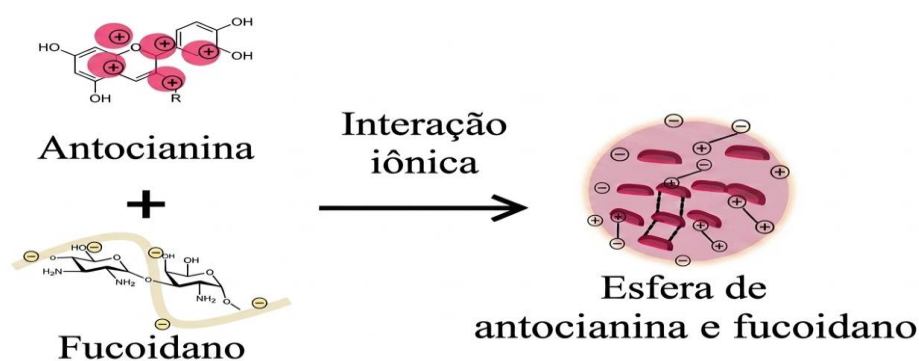


Figura 3 – Esquema de encapsulação de antocianinas utilizando fucoidano (Lee *et al.*, 2020).

Dentre as técnicas de encapsulação, a gelificação iônica aliada a etapa de liofilização é um dos métodos comumente empregados, oferecendo condições

adequadas para produção de esferas, não envolvendo altas temperaturas ou solventes orgânicos (Mohammadalinejad *et al.*, 2023; Naliyadhara; Trujillo, 2025).

3.1.3 Gelificação Iônica Externa e Liofilização

A técnica de gelificação externa é o método químico mais simples e comumente utilizado para a fabricação de esferas e encapsulamentos (Figura 4). Essa metodologia é chamada de método de gotejamento, na qual a solução polimérica é extrudada, gota a gota, através de um bocal, em um banho de gelificação contendo cátions como CaCl_2 (Paiboon *et al.*, 2023).

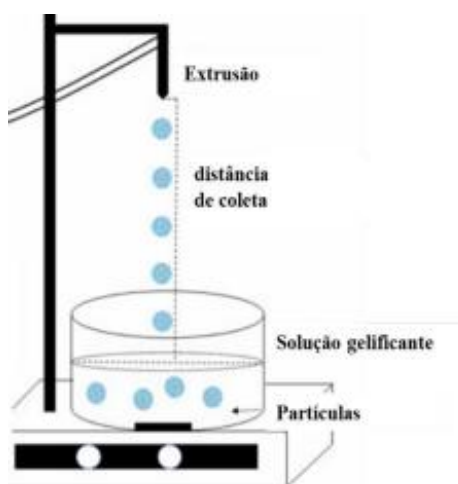


Figura 4 – Representação do processo de gelificação iônica externa (Sultana *et al.*, 2022).

O mecanismo de gelificação iônica externa envolve a adição de cálcio em sua forma solúvel, resultando em uma gelificação rápida e na formação de uma rede de gel heterogênea, podendo ser utilizada para formar sistemas de gel adequados para o carregamento de fitoquímicos (Shu *et al.*, 2023). A gelificação iônica externa tem a vantagem de empregar condições brandas, uma vez que apresenta baixo custo, não utiliza solventes orgânicos e altas temperaturas, possibilitando a encapsulação de moléculas sensíveis (Moura *et al.*, 2019).

A liofilização é uma tecnologia física adequada para compostos sensíveis, uma vez que a técnica utiliza baixas temperaturas para congelar a amostra, que posteriormente é submetida à baixa pressão, levando à sublimação dos cristais de gelo (Figura 5), na qual a umidade é convertida da fase líquida para a fase gasosa, formando um pó (Rezvankhah; Emam-Djomeh; Askari, 2019).

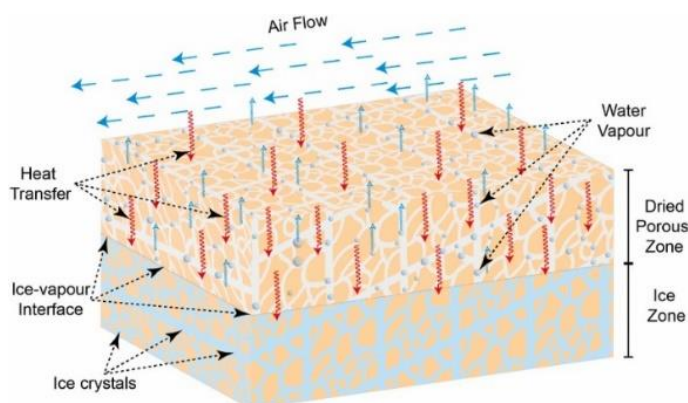


Figura 5 – Representação esquemática da etapa de liofilização (Naliyadhara; Trujillo, 2025).

A eficácia de tais técnicas, no entanto, depende da escolha dos materiais de parede, que devem ser capazes de formar uma barreira protetora eficaz ao redor das antocianinas. Biopolímeros como proteínas, polissacarídeos e lipídeos vem sendo empregados como materiais de parede para antocianinas, independente do método de encapsulação utilizado (Mahdavi; Jafari; Ghorbani; Assadpoor, 2014). Dentre os polissacarídeos utilizados como material de parede, o alginato de sódio e o fucoídano têm despertado grande interesse devido suas propriedades funcionais (Fernando *et al.*, 2019).

3.1.4 Antocianinas

As antocianinas são classificadas como um composto flavonoide formado por antocianidina e açúcares ligados por ligações glicosídicas (Attaribo *et al.*, 2020). Diversas espécies vegetais (27 famílias e 73 gêneros) contém antocianinas (Xue *et al.*, 2024). As antocianinas ocorrem principalmente na seiva celular das plantas, atribuindo cores (azul, magenta e vermelho) em raízes, caules, flores, folhas e frutos (Zhang *et al.*, 2022). Esse pigmento natural tem atraído crescente interesse devido à sua segurança e por não ser tóxico (Xue *et al.*, 2024). Diversos estudos afirmaram que as antocianinas exibem numerosas atividades biológicas, como ação antioxidante, anti-inflamatória, antitumoral, hipoglicêmica, entre outros (Yang *et al.*, 2022) e que mais de 700 antocianinas naturais foram isoladas de plantas, incluindo seis monômeros de antocianinas (cianidina, delphinidina, malvidina, pelargonidina, peonidina e petunidina (Ai *et al.*, 2023).

No entanto, estudos têm indicado que o pH, temperatura, luz, oxigênio e

outros fatores podem prejudicar a estabilidade das antocianinas (Xue *et al.*, 2024). Em diferentes valores de pH, em meio aquoso, a mudança de cor das antocianinas varia entre vermelho, rosa, incolor e azul, apresentando forte estabilidade em pH 2-3 e estabilidade relativamente baixa em condições neutras e alcalinas (Zhao, Zhang, Chen, Zhang e He, 2019). O processo de degradação das antocianinas também pode ser endotérmico e facilmente influenciado pela temperatura (Sendri, Singh, Sharma, Purothi e Bhandari, 2023). Baixas temperaturas são mais favoráveis para a estabilidade estrutural das antocianinas, indicando que as antocianinas apresentam maior estabilidade na faixa de temperatura de 2 – 4 °C (Liu *et al.*, 2023; Stoica *et al.*, 2023).

As antocianinas são fortemente degradadas quando expostas à radiação ultravioleta (UV) (Junior *et al.*, 2023). A presença de oxigênio acelera a degradação das antocianinas, por mecanismos oxidativos diretos ou pela ação de oxidases (Patras, Brunton, Odonnell e Tiwari, 2010). Portanto, as antocianinas devem evitar a exposição à luz e ao elevado teor de oxigênio para evitar sua degradação ao longo do tempo (Xue *et al.*, 2024).

A encapsulação é uma alternativa que vem sendo amplamente estudada para melhorar a estabilidade das antocianinas (Xue *et al.*, 2024). Zhao, Zhang, et al. (2020) prepararam nanopartículas misturando quitosana, pectina e antocianinas em diferentes proporções. A taxa de incorporação de antocianinas nas nanopartículas foi de 66,68%. As antocianinas encapsuladas apresentaram capacidade de liberação controlada no trato gastrointestinal e aceleraram a apoptose de células cancerígenas. Lee *et al.*, (2020) observaram que antocianinas de frutas vermelhas e fucoidano formam um complexo por meio de ligações eletrostáticas, apresentando maior permeabilidade celular e estabilidade química plasmática, inibindo a inflamação e a produção de células cancerígenas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

A alga *Sargassum cymosum* C. Agardh, comumente denominada de alga parda, foi coletada em Praia Grande, Ubatuba, estado de São Paulo (23°28 '00 "S - 45°03' 36"W), sanitizada com água clorada (25 ppm) e seca em estufa com circulação de ar a 45°C. O material desidratado foi triturado e, o pó algal obtido, acondicionado em local seco sob temperatura ambiente.

Os frutos de *Rubus spp.* (amora preta), foram coletados na cidade de Assis, São Paulo. O alginato de sódio comercial de médio peso molecular (Sigma-Aldrich, A2033) foi adquirido da Sigma Aldrich. Os demais reagentes utilizados foram de grau analítico.

4.2 Extração do fucoidano

Na etapa de pré-tratamento, alga seca e moída (7g) foi tratada com 50 ml etanol 99,8% para a remoção de impurezas. A amostra foi mantida sob agitação, em agitador magnético a 195 rpm, temperatura ambiente, por 6 h, com troca de solvente a cada 3 h. Posteriormente, o solvente foi desprezado e a alga transferida para estufa de circulação de ar, a 40 °C por 12 h (Nogueira *et al.*, 2022). Após pré-tratamento, foi realizada a etapa ácida que consistiu na adição de solução de ácido cítrico 40% (p/v) à amostra, sob agitação branda, em agitador magnético, até pH 1.5. A suspensão foi submetida ao homogeneizador ultrassônico com sonda de 12,7 mm de diâmetro (ORT-500, OMNI International™), frequência de 20 kHz e potência máxima de 400 W, a 15 °C durante 11 min, seguida de filtração à vácuo. O filtrado foi precipitado com CaCl₂ 3% (p/v), na razão 1:1, para remoção de alginato e demais impurezas (Hifney *et al.*, 2016).

A amostra obtida foi mantida em estufa BOD a 4 °C por 12 h, seguida de centrifugação a 11°C e 4000 rpm durante 30 min (Hifney *et al.*, 2016) e filtração a vácuo. Para a precipitação do fucoidano foi adicionado, na parte líquida, etanol 99,8% na razão 1:2 (Hifney *et al.*, 2016), e a amostra mantida novamente em estufa BOD a 4 °C durante 12 h. A centrifugação foi repetida, nas mesmas condições anteriores, o sobrenadante descartado e o pellet de fucoidano coletado (Hifney *et al.*, 2016). As

amostras foram congeladas e liofilizadas (LJJ, JJ Científica, Assis, São Paulo) à -50 °C durante 48 h, sob 150 mbar de pressão, armazenadas em tubo falcon e mantidas em freezer até análises posteriores. O fucoidano obtido e liofilizado é apresentado na Figura 6.

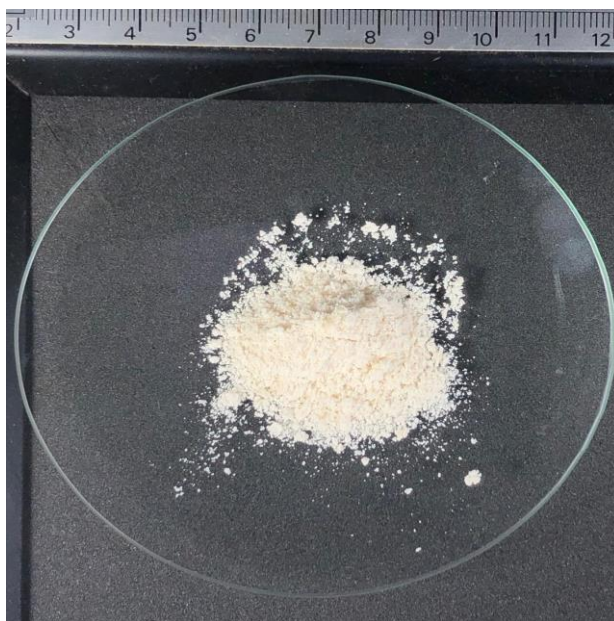


Figura 6 – Fucoidano liofilizado extraído da alga *Sargassum cymosum* C. Agardh

4.3 Extração e concentração de antocianinas de polpa de amora

Os frutos de *Rubus spp.* (amora-preta) foram higienizados com água corrente e triturados com água, na razão de sólido:líquido 1:3 (m/v), em um mixer doméstico. As amostras foram mantidas sob agitação, em agitador magnético a 195 rpm, ao abrigo da luz e em temperatura ambiente durante 6 h, seguido de filtração à vácuo. A solução foi concentrada em um rotaevaporador R-3 Buchi (Figura 7) a 45 °C até $\frac{1}{3}$ do volume inicial (Souza; Thomazini; Balieiro e Fávaro-Trindade, 2015).

O extrato obtido foi congelado, liofilizado a -50 °C durante 48 h, sob 150 mbar de pressão e armazenado em dessecador até posterior caracterização física e química e emprego nas formulações.



Figura 7 – Concentração da solução aquosa de polpa de amora em rotaevaporador

4.4 Formulações de hidrogéis a base de fucoidano, alginato de sódio e extrato de antocianinas

Foram preparadas formulações contendo diferentes concentrações de fucoidano (0%, 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1% (p/v)), alginato de sódio 2% (p/v), e antocianina 1% (p/v). Formulações com as mesmas concentrações de fucoidano e alginato, porém sem a adição de antocianinas, também foram preparadas para fins comparativos.

Para o preparo da formulação 0,4 g de alginato foi hidratado em 10 ml de água deionizada por 24 h. Posteriormente, fucoidano em pó, em uma dada concentração, foi diluído em 10 ml de água deionizada e a solução obtida adicionada, sob agitação, na solução de alginato. As amostras foram levadas ao banho maria e mantidas até atingir 95 °C para a solubilização completa do alginato. Em seguida, 0,2 g do extrato liofilizado de antocianinas foi adicionado aos polissacarídeos e homogeneizado em agitador Ultra-Turrax (NT 138, Nova Técnica, Piracicaba, São Paulo, Brasil) a 7521 rpm, em temperatura ambiente por 30 seg. As formulações sem antocianinas foram preparadas da mesma forma.

4.5 Produção das esferas úmidas e liofilizadas

As formulações contendo os polissacarídeos, com ou sem antocianinas, foram transferidas para uma seringa de 10 ml e agulha de 1,2 mm de diâmetro e gotejadas a uma distância de aproximadamente 0,5 cm da solução de CaCl_2 450mM (Zhang; Chen, 2019). Após 10 min na solução reticulante, as esferas foram lavadas com água deionizada e submetidas a secagem da superfície das esferas por filtração a vácuo. Na sequência, as esferas previamente secas foram congeladas por 24 h e liofilizadas no liofilizador (LJJ, JJ Científica, São Carlos, São Paulo, Brasil) na temperatura de $-50\text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h (Chen *et al.*, 2025).

4.6 Caracterização do extrato de antocianinas

4.6.1 pH e sólidos solúveis

Para a determinação do pH, foi utilizado o pHmetro (K38-130 Kasvi, Pinhais, Paraná, Brasil), calibrado em soluções tampão pH 4 e 7, seguindo as normas da AOAC (2005). Os sólidos solúveis foram determinados com um refratômetro (MFL Acessórios, São Paulo, São Paulo, Brasil).

4.6.2 Umidade

Para a determinação da umidade, as amostras foram pesadas em cadinhos, secas em estufa com circulação de ar a $105\text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem peso constante (AOAC, 2000).

4.6.3 Acidez titulável

O teor de acidez total titulável foi determinado através da metodologia de AOAC (2005). O extrato concentrado foi diluído em água deionizada e, em seguida, titulada com solução de hidróxido de sódio 0,1 N até atingir pH 8,1, utilizando o pHmetro (K38-130 Kasvi, Pinhais, Paraná, Brasil), previamente calibrado com soluções tampão pH 4 e 7.

4.6.4 Antocianinas totais

O teor de antocianinas totais do extrato concentrado, liofilizado e da solução de CaCl_2 450mM, foi determinado através do método de pH diferencial conforme AOAC (2005). Uma alíquota de cada amostra foi adicionada às soluções tampão pH 1 e 4.5. Posteriormente, a absorbância foi registrada utilizando um espectrofotômetro UV-visível (SP-220, Biospectro, Curitiba, São Paulo, Brasil) nos comprimentos de onda de 520 e 700 nm. O teor de antocianinas totais (AT) do extrato concentrado foi expresso em equivalentes de cianidina-3-glicosídeo (C3G) por 100 g de matéria seca (mg C3G/ 100 g b.s) e para o extrato liofilizado o teor de antocianinas totais foi expresso em equivalentes de C3G por 100 g de base úmida (mg C3G/ 100 g b.u) de acordo com a Equação (1):

$$AT = \frac{A \times MW \times DF \times 10^2}{\varepsilon \times 1} \quad (1)$$

onde: A = (Absorbância 520 nm - Absorbância 700 nm) pH 1 - (Absorbância 520 nm - Absorbância 700 nm) pH 4.5; MW = peso molecular de 449,2 g/mol de cianidina-3-glicosídeo ; DF = fator de diluição; 1 = comprimento do percurso de luz na cubeta; ε = coeficiente de extinção molar de 26.900; 10^2 = fator de conversão mg para mg/100 g de matéria seca.

4.6.5 Fenólicos totais

O teor de fenólicos totais do extrato concentrado foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu segundo metodologia de Singleton e Rossi citado por Amerine e Ough (1976). Para a quantificação, foi construída curva analítica utilizando ácido gálico como padrão, em diferentes concentrações. A absorbância foi determinada em espectrofotômetro UV-visível (SP-220, Biospectro, Curitiba, São Paulo, Brasil) a 765 nm, e os resultados foram expressos em miligramas de equivalente de ácido gálico por 100 g de amostra em base seca (mg ácido gálico/100 g b.s.).

4.7 Caracterização das formulações de alginato de sódio, fucoidano e extrato de antocianinas

4.7.1 Análise Reológica

Análises reológicas das diferentes formulações contendo fucoidano (0,25 – 1%), alginato de sódio (2%) e com adição de antocianinas (1%) foram realizadas utilizando o reômetro (MCR-92, Anton Paar, Graz, Áustria), com geometria de cilindros concêntricos à 55 °C. As taxas de cisalhamento foram determinadas na faixa de 0,01 a 300 s⁻¹ e as curvas de fluxo foram ajustadas pelo modelo da lei da potência Equação (2).

$$\tau = K * \gamma^n \quad (2)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa); γ é a taxa de cisalhamento (s⁻¹); K é o índice de consistência (Pa.sⁿ); e n é o índice de comportamento de fluxo.

4.7.2 Potencial Zeta (PZ), índice de polidispersão (PDI) e diâmetro hidrodinâmico (DH)

As formulações contendo diferentes concentrações de fucoidano (0,25% – 1%), alginato de sódio (2%) e antocianinas (1%) foram caracterizadas em relação ao diâmetro hidrodinâmico (DH), índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta (ZP), determinados através do analisador de partículas e espalhamento dinâmico de luz (DLS) (Zetasizer ultra, Malvern, Reino Unido) a 25 °C. Previamente à análise, as amostras foram diluídas (1:99) com água deionizada.

4.8 Análises das esferas

4.8.1 Eficiência de encapsulação e carregamento

A eficiência de encapsulação (EE%) e de carregamento (EC%) das antocianinas (1%) das esferas elaboradas com fucoidano (0,25% – 1%) e alginato de sódio (2%) foram avaliadas utilizando as equações (3) e (4), respectivamente (Yan; Pan; Cai; Xiao, 2025).

$$EE (\%) = (m_0 - m_1)/m_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$EC (\%) = (m_0 - m_1)/m_2 \times 100\% \quad (4)$$

onde m_0 é a massa total de antocianinas (mg) adicionadas na formulação com fucoidano e alginato; m_1 representa a quantidade de antocianinas presente na solução reticulante de CaCl_2 (mg), ou seja, a fração não encapsulada; m_2 representa a massa das esferas secas (mg).

A quantificação de antocianinas nas amostras foi determinada conforme metodologia descrita no item 3.5.4.

4.8.2 Solubilidade

A solubilidade das esferas formuladas com fucoidano (0,25% – 1%), alginato de sódio (2%) e antocianinas (1%) foi avaliada através do método gravimétrico, que consistiu na dispersão da amostra (0,2 g) em água deionizada (20 mL), agitação por 30 min à temperatura ambiente e centrifugação a 3600 rpm por 5 min. A fase aquosa foi transferida para uma placa Petri, previamente pesada e seca, e levada para uma estufa de circulação de ar a 105 °C. Com o peso seco do sólido solúvel, a solubilidade foi calculada utilizando a equação (5) (Xu *et al.*, 2022).

$$\text{Solubilidade } (\%) = \frac{\text{peso do sobrenadante seco}}{\text{peso inicial da amostra}} \times 100 \quad (5)$$

4.8.3 Intumescimento

O intumescimento das esferas com diferentes concentrações de fucoidano (0,25% – 1%), alginato de sódio (2%) e antocianinas (1%) foi avaliado através da dispersão de 40 mg de esferas em 50 ml água deionizada (Li *et al.*, 2021). As esferas foram removidas da água, secas com papel filtro, para eliminar o excesso de água da superfície, e pesadas em diferentes intervalos de tempo (10, 20, 30, 40, 60 e 70 min). A capacidade de intumescimento foi calculada conforme a equação (6), para os diferentes tempos (Li *et al.*, 2021).

$$\text{Intumescimento (\%)} = \frac{w_w - w_d}{w_d} \times 100 \quad (6)$$

Onde w_w representa a massa das esferas úmidas (g) e w_d representa a massa das esferas secas (g).

4.8.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier com Refletância Total Atenuada (FTIR-ATR)

As alterações das estruturas químicas e a avaliação dos grupos funcionais presentes nas amostras de fucoidano (0,25% – 1%), alginato de sódio (2%) e antocianinas (1%), assim como da amostra de fucoidano, foram analisadas com um espectrômetro FTIR Spectrum One (Perkin Elmer, Waltham, MA, EUA) equipado com um acessório de Refletância Total Atenuada Universal (ATR). Os espectros foram registrados na faixa de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ por meio da aquisição de 32 varreduras com resolução de 4 cm^{-1} .

4.8.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das esferas elaboradas com as diferentes concentrações de fucoidano (0,25% – 1%), alginato de sódio (2%) e antocianinas (1%), e do fucoidano em pó foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (HITACHI, TM3000, Tóquio, Japão) com tensão de aceleração de 15 kV e ampliações de 100x, 500x e 1500x. As amostras foram pré-condicionadas por 12 h em um dessecador a vácuo e fixadas em suportes de alumínio utilizando fita de carbono condutora, sem qualquer preparação adicional.

4.9 Análise estatística

As análises de potencial zeta, diâmetro hidrodinâmico, índice de polidispersão, reologia, eficiência de encapsulação e carregamento, pH, intumescimento e solubilidade foram realizadas em, no mínimo, duplicata, e os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão. Diferenças significativas foram avaliadas por análise de variância (ANOVA) de uma via e pelo teste post-hoc

Tukey, com nível de significância $p < 0,05$. O ajuste do modelo da lei da potência, análises estatísticas e construção de gráficos foram realizados com o software OriginLab (OriginLab Corporation, Northampton, MA, EUA).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do extrato de antocianinas de polpa de amora

Os resultados das análises físicas e químicas do extrato concentrado de antocianinas estão apresentados na Tabela 1. O teor de sólidos (5,70 °Brix) verificado no extrato concentrado de amora foi próximo aos relatados por Tadeu et al. (2015) (9,05 °Brix), Yamashita et al. (2017) (8,08 °Brix) e Schiassi et al. (2020) (5,67 °Brix) em estudos com extratos de antocianinas de amora-preta (*Rubus spp.*).

Em relação ao pH e à acidez titulável, os resultados indicam um meio favorável para a estabilidade química das antocianinas, uma vez que esses compostos são mais estáveis em meio ácido (Schiassi et al., 2020). Valores próximos foram reportados por De Souza et al. (2014), que relataram pH de 2,99 e acidez titulável de 1,51 %. Yamashita et al. (2017) obtiveram pH de 3,27 e acidez de 0,94%, enquanto Garazhian et al. (2020) observaram acidez de 0,83% em quatro espécies diferentes de amora-preta. Os resultados do presente estudo mostraram que o teor de umidade do extrato concentrado de antocianinas (95,56%) foi condizente com os valores reportados por Lameiro et al. (2011) (92,43%) e Monteiro et al. (2011) (91,67%), confirmando a elevada fração aquosa característica de extratos obtidos com solventes polares (Chatepa et al., 2024).

O extrato liofilizado exibiu teor de antocianinas totais de 1461,15 mg cianidina-3-glicosídeo (C3G)/100 g em base úmida (b.u.), enquanto o extrato concentrado apresentou teor de antocianinas totais de 1248,68 mg cianidina-3-glicosídeo (C3G)/100 g em base seca (b.s.), valor superior aos reportados por Albert et al. (2022) (780,13 mg C3G/100 g b.s.), Yamashita et al. (2017) (389,09 mg C3G/100 g b.s.) e Memete et al. (2023) (670,03 mg C3G/100 g b.s.). Essa diferença pode ser relacionada às condições de extração e concentração empregada para obtenção do extrato aquoso. O teor de compostos fenólicos totais foi de 757,13 mg ácido gálico (AG)/100g b.s, resultado comparável ao observado por Souza et al. (2014) (850,52 mg ácido gálico/100 g b.s), que avaliaram compostos bioativos, atividade antioxidante e composição química de amora-preta, framboesa vermelha, morango, mirtilo e cereja doce.

Esse resultado satisfatório obtido para os teores de antocianinas e compostos fenólicos no extrato pode estar relacionado ao tipo de solvente empregado

na extração. O uso de solvente aquoso apresenta vantagens reconhecidas para a recuperação de antocianinas, incluindo segurança e viabilidade econômica para aplicações alimentícias (Jeyaraj *et al.*, 2021). Além disso, a concentração do extrato foi realizada a baixa temperatura (45 °C). Temperaturas entre 45 e 60 °C são recomendadas por favorecerem o rendimento e reduzirem a degradação térmica das antocianinas (Jeyaraj *et al.*, 2021; Netravati *et al.*, 2022; Thuy *et al.*, 2021). Assim, tais parâmetros metodológicos podem ter contribuído para a elevada retenção de antocianinas observada no extrato concentrado de *Rubus* spp, demonstrando que as metodologias empregadas no processo de extração e concentração foram eficientes para a obtenção de um extrato de amora-preta (*Rubus* spp.) rico em antocianinas.

Tabela 1. Caracterização física e química do extrato concentrado de antocianina de polpa de amora-preta

Análises Físico-químicas	Extrato concentrado
pH	3,41 ± 0,05
Sólidos Solúveis (°Brix)	5,70 ± 0,17
Umidade (%)	95,56 ± 0,16
Acidez total titulável (%)	1,67 ± 0,40
Antocianinas Monoméricas Totais (mg cianidina-3-glicosídeo/100g bs)	1248,68 ± 74,07
Fenólicos Totais (mg ácido gálico anidro/100g bs)	757,13 ± 25,83

Os dados são apresentados como média ± desvio padrão ($n = 3$).

5.2 Caracterização das formulações de alginato de sódio, fucoidano e extrato de antocianinas

5.2.1 Análise Reológica

As curvas de fluxo das formulações preparadas com diferentes concentrações de fucoidano (0,25 – 1,0%), alginato (2%) e antocianinas (1%) estão apresentadas na Figura 8. Os dados experimentais ajustaram-se satisfatoriamente ao

modelo da Lei da Potência ($R^2 > 0,92$), evidenciando comportamento pseudoplástico, confirmado pelos valores de índice de comportamento do fluido inferior à unidade ($n < 1$) (Tabela 2).

A formulação contendo 0,5% de fucoidano apresentou menor resistência ao escoamento devido à sua viscosidade moderada, o que se mostrou ideal para o processo de gotejamento, facilitando a passagem da formulação pelo bico da agulha de 1,2 mm sem causar entupimentos ou exigir pressões excessivas. As formulações contendo 0,75 e 1% de fucoidano exibiram os maiores valores de índice de consistência (k). O aumento da concentração de fucoidano promoveu aumento do índice de consistência e pseudoplasticidade, possivelmente devido às interações eletrostáticas entre os grupos aniônicos dos polissacarídeos e a forma catiônica partículas positivas das antocianinas, favorecendo a formação de uma rede polissacarídica mais estável, com maior consistência e viscosidade (Zhu *et al.*, 2019; Pang *et al.*, 2020). Por outro lado, os valores de (n) de todas as formulações contendo fucoidano foram inferiores a 1 e diminuíram com aumento da concentração de fucoidano, principalmente para as amostras contendo 0,75 e 1 % de fucoidano, indicando que a adição do polissacarídeo intensificou o carácter pseudoplástico das formulações coloidais. Este comportamento reológico também foi verificado por Bak e Yoo (2025) que relataram redução do índice de comportamento do fluido (n) com o aumento da concentração de fucoidano, indicando que sua adição intensificou o carácter pseudoplástico da solução.

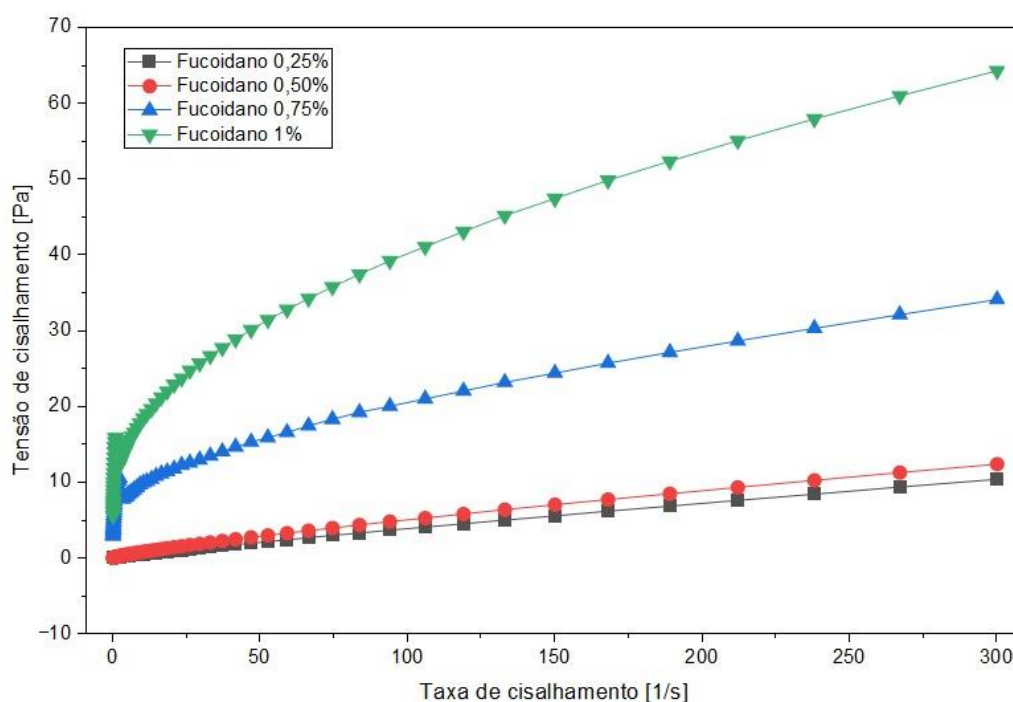


Figura 8 – Curvas de fluxo das soluções com diferentes concentrações de fucoidano (0,25 – 1,0%), alginato (2%) e antocianina (1%)

Tabela 2. Parâmetros de ajuste do modelo da lei da potência das formulações com diferentes concentrações de fucoidano (FUC), alginato (2%) e antocianinas (1%): n é o índice de comportamento de fluxo, k é o índice de consistência e R^2 é o coeficiente de correlação

FUC (%)	n	k (Pa.sn)	R^2
0,25	$0,90^a \pm 0,0$	$0,06^a \pm 0,0$	0,99
0,50	$0,81^a \pm 0,03$	$0,12^a \pm 0,01$	0,99
0,75	$0,29^b \pm 0,02$	$5,78^b \pm 0,23$	0,93
1,0	$0,31^b \pm 0,0$	$10,03^c \pm 0,0$	0,96

Letras diferentes na coluna indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$). Os dados são apresentados como média $\pm$ desvio padrão ($n = 2$).

5.2.2 Potencial Zeta (PZ), diâmetro hidrodinâmico (DH), índice de polidispersão (PDI) e pH das formulações com diferentes concentrações de fucoidano

O potencial zeta (PZ), tamanho hidrodinâmico, índice de polidispersão (PDI) e pH das formulações elaboradas com diferentes concentrações de fucoidano estão apresentados na Tabela 3. A adição do fucoidano nas formulações de alginato,

com e sem antocianinas, acarretou na diminuição do pH das soluções. Em meio ácido, as antocianinas passam a predominar na forma de cátion flavílium, aumentando a densidade de cargas positivas no sistema. Esse comportamento pode favorecer interações eletrostáticas com os grupos carboxílicos do alginato e sulfatos do fucoidano, ambos carregados negativamente (Ettoumi *et al.*, 2024).

Todas as formulações apresentaram valores de PZ inferiores a -30 mV, indicando boa estabilidade coloidal (Wang *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2014). Esses valores podem ser atribuídos ao aumento das cargas negativas provenientes dos grupos carboxílico do alginato e sulfato do fucodiano (Kavoosi *et al.* 2018; Fernando *et al.* 2020; Xi *et al.* 2023).

Entretanto, independente da formulação, foi observada uma diminuição da magnitude das cargas negativas nas dispersões com e sem antocianinas, possivelmente associada às interações entre partículas, favorecendo atividades moleculares como forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio (Fernando *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021). Além disso, a redução do PZ após a adição de antocianinas pode estar associada à interação entre os grupos aniônicos dos polissacarídeos e a forma catiônica flavílium das antocianinas, contribuindo para a protonação dos grupos sulfato e carboxílico e, conseqüentemente, reduzindo as cargas negativas do sistema (Tao *et al.*, 2025).

O índice de polidispersão (PDI) representa a distribuição do tamanho das partículas presentes nas formulações de alginato, fucoidano e extrato de antocianinas, sendo um indicativo da homogeneidade da dispersão. Os valores variam de 0 a 1, sendo aqueles próximos de 0 característicos de sistemas mais monodispersos e com distribuição de tamanho mais homogênea (Mirković *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021). Em contrapartida, valores próximos a 1 indicam ampla distribuição do tamanho entre as partículas da formulação, aumentando a tendência à agregação e à precipitação (Mirković *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021).

Valores de PDI próximos a zero, juntamente com o PZ inferiores a -30 mV ou superiores a +30 mV, indicam boa dispersão e estabilidade coloidal e previne a aglomeração de partículas (Wang *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2014). Entre as formulações consideradas satisfatórias para dispersões coloidais estáveis, destacam-se aquelas preparadas sem fucoidano e sem antocianina, que apresentaram valores de PDI de 0,4 e PZ de -65,80, bem como a formulação contendo 0,5% de fucoidano e 1% de

antocianina, com valores de PDI de 0,4 e PZ de -51,44 mV. Por outro lado, a formulação contendo 0,5% de fucoïdano sem adição de antocianinas apresentou PDI elevado (0,9), apesar do adequado valor de PZ (-58,56 mV). As demais formulações exibiram altos valores de PDI, indicando maior heterogeneidade no tamanho das partículas e maior tendência à agregação.

Os maiores diâmetros hidrodinâmicos (4,5 e 4,9 μm) foram observados nas formulações preparadas com 0,5 e 0,75% de fucoïdano contendo 1% de antocianina, respectivamente, indicando um possível efeito de ponte e associação intermolecular entre as antocianinas e os polissacarídeos (Fu *et al.*, 2023). No entanto, as formulações de contendo 1% de fucoïdano, com ou sem antocianina, apresentaram diminuição do diâmetro hidrodinâmico, possivelmente devido à maior compactação estrutural do sistema em meio ácido. Esse comportamento também foi verificado por Brovko *et al.* (2023), que observaram tamanhos hidrodinâmicos significativamente menores com o aumento da concentração de fucoïdano. Isso pode estar relacionado à aproximação molecular entre fucoïdano, alginato e antocianinas, favorecidas por múltiplas ligações de hidrogênio, o que limita a expansão do diâmetro das partículas (Brovko *et al.*, 2023). Além disso, esse efeito pode explicar a maior magnitude do PZ da formulação contendo 1% de fucoïdano. Portanto, a formulação contendo 0,50% de fucoïdano e 1% de antocianina apresentou resultados satisfatórios quanto à estabilidade coloidal, evidenciados pelos valores de potencial zeta, índice de polidispersão e tamanho hidrodinâmico.

Tabela 3. Potencial Zeta (PZ), diâmetro hidrodinâmico (DH), índice de polidispersão (PDI) e pH das formulações com diferentes concentrações de fucoidano (FUC), alginato (2%) e antocianinas (ANT), com e sem extrato de antocianinas.

	FUC (%)	DH (μm)	PZ (mV)	PDI	pH
ANT (0%)	0	$0,5^a \pm 0,1$	$-65,80^a \pm 3,5$	$0,4^{ac} \pm 0,1$	$6,4^a \pm 0,1$
	0,25	$0,9^a \pm 0,0$	$-61,21^{ab} \pm 1,6$	$0,7^{abc} \pm 0,0$	$4,1^b \pm 0,1$
	0,50	$1,5^{abe} \pm 0,0$	$-58,56^{ab} \pm 1,7$	$0,9^{bc} \pm 0,1$	$3,8^{ce} \pm 0,1$
	0,75	$2,2^{abe} \pm 0,5$	$-55,81^{abe} \pm 2,1$	$0,9^b \pm 0,0$	$3,5^{de} \pm 0,1$
	1,0	$1,0^a \pm 0,2$	$-39,38^{cf} \pm 3,6$	$0,8^{bc} \pm 0,1$	$3,4^d \pm 0,0$
ANT (1%)	0	$2,5^{abce} \pm 0,5$	$-53,46^{bde} \pm 1,3$	$1,0^b \pm 0,0$	$4,1^b \pm 0,2$
	0,25	$3,5^{bcd} \pm 0,3$	$-51,03^{be} \pm 3,6$	$0,9^b \pm 0,1$	$3,8^{bce} \pm 0,1$
	0,50	$4,5^{cd} \pm 0,2$	$-51,44^{be} \pm 1,8$	$0,4^c \pm 0,0$	$3,6^{ef} \pm 0,0$
	0,75	$4,9^d \pm 0,1$	$-45,32^{ce} \pm 3,4$	$0,6^{ac} \pm 0,1$	$3,5^{df} \pm 0,0$
	1,0	$3,4^{de} \pm 1,4$	$-36,92^{cf} \pm 2,6$	$0,7^{ab} \pm 0,1$	$3,3^d \pm 0,1$

Letras diferentes na coluna indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$). Os dados são apresentados como média $\pm$ desvio padrão ($n = 2$).

5.2.3 Avaliação da aparência visual das esferas

A concentração de fucoidano adicionado na formulação influenciou as características visuais das esferas elaboradas com alginato e antocianina (Figura 9). Durante o processo de obtenção das esferas, à medida que a solução contendo fucoidano, alginato e antocianina é gotejada na solução de cloreto de cálcio, os íons Ca^{2+} difundem-se para a superfície externa da gota, iniciando o processo de gelificação iônica externa (Yan *et al.*, 2025). Neste processo, a camada externa da esfera, constituída principalmente de alginato, sofre reticulação com os íons Ca^{2+} ,

permitindo a difusão dos íons de cálcio para as regiões internas e, como resultado, ocorre contração progressiva do núcleo da esfera (Alhawiti *et al.*, 2023; Pathak *et al.*, 2010). A concentração de fucoidano pode controlar a taxa de difusão dos íons Ca^{2+} para o interior das esferas, influenciando a contração do núcleo, bem como aparência rugosa das esferas formadas.

Na Figura 9A também é possível observar que a concentração de fucoidano não teve efeito na formação inicial das esferas. No entanto, o processo de secagem exerceu influência sobre o tamanho e a aparência visual das esferas. O aumento da concentração de fucoidano resultou em esferas de maior tamanho após liofilização. No entanto, nas esferas formuladas sem fucoidano, o processo de secagem modificou acentuadamente a aparência superficial da maioria das amostras. A estrutura das esferas apresentou contração, resultando em superfícies mais porosas, irregulares e rugosas. Isso pode indicar que, em formulações sem ou contendo baixas concentrações de fucoidano (0,25 %), a camada externa da esfera apresentou menor resistência, permitindo difusão mais rápida dos íons Ca^{2+} para o interior da esfera. Consequentemente, a ausência ou a baixa concentração de um material de parede pode ter favorecido maior contração das esferas após a liofilização, resultando em estruturas menores após a secagem (Yan *et al.*, 2025).

Nas maiores concentrações de fucoidano (0,75 e 1%), ocorreu a formação de uma camada externa menos rugosa, dificultando a entrada de Ca^{2+} para o interior da esfera e levando à formação mais lenta da rede interna do gel durante a reticulação. Entretanto, quando comparadas às esferas sem fucoidano, as esferas compostas por fucoidano, alginato e antocianina apresentaram maior estabilidade e menor variação de tamanho após a liofilização. Esse comportamento pode estar associado à atuação do fucoidano como um material de parede após a reticulação com cloreto de cálcio. A reticulação interna aumentou a resistência à contração das esferas em função do aumento da concentração de fucoidano durante o processo de liofilização. A concentração de fucoidano 0,5% foi a que melhor preservou a estrutura das esferas, impedindo danos estruturais.

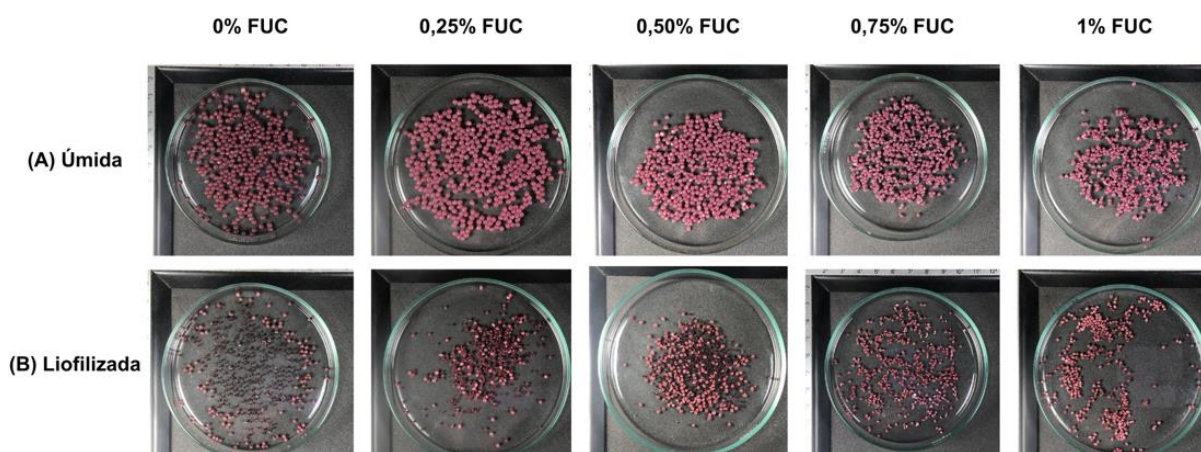


Figura 9 – Esferas úmidas e liofilizadas de diferentes concentrações de fucoidano (FUC), 2% alginato e (1%) antocianinas. Linha (A) esferas úmidas, linha (B) esferas liofilizadas

5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das superfícies das esferas foram avaliadas por MEV com e as imagens estão apresentadas na Figura 10. A superfície das esferas sem adição de fucoidano (Figura 10A) apresentaram uma estrutura rugosa e irregular. Esse comportamento pode estar associado ao processo de liofilização, no qual a sublimação da água congelada, presente no interior das esferas, promove a formação de vazios estruturais, resultando morfologia irregular, distorcida e com baixa resistência mecânica, o que pode dificultar a encapsulação da antocianina (Chan *et al.*, 2011).

As esferas sem e com 0,25% de fucoidano (Figura 10A e 10B), respectivamente, exibiram superfície irregular e menor uniformidade após liofilização. Por outro lado, as esferas contendo 0,50% e 0,75% de fucoidano, respectivamente Figuras 10C e 10D, apresentaram morfologia com superfície externa menos rugosa, comportamento que pode ser atribuído à difusão mais rápida dos íons de cálcio na região superficial e à rápida solidificação da gota do hidrogel na solução de cloreto de cálcio (Xia *et al.*, 2024). Esse processo favorece a rápida formação de uma camada externa compacta, que limita a penetração adicional de cálcio e, consequentemente, possibilitando a formação interna completa da esfera, resultando em uma estrutura interna mais frouxa (Xia *et al.*, 2024).

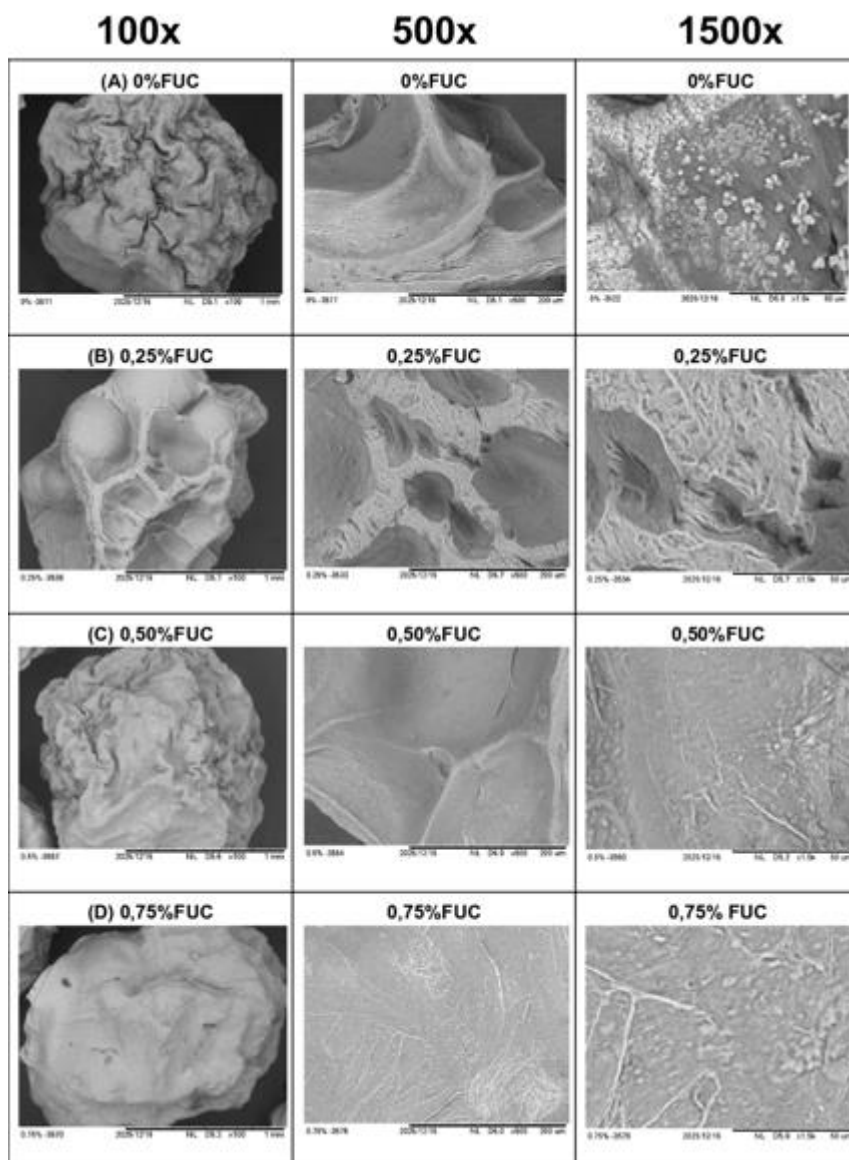


Figura 10 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura das esferas liofilizadas de diferentes concentrações de fucoidano (FUC), 2% alginato e (1%) antocianinas

Assim, de modo geral, o aumento da concentração de fucoidano influenciou a morfologia das esferas, resultando em superfícies mais densas, uniformes e menos rugosas. Comportamento morfológico semelhante foi descrito por Ma et al. (2025), que verificaram que microesferas de aerogel de fucoidano exibiram superfícies densas e com reduzida porosidade. Yan et al. (2025) também observaram que esferas de alginato de sódio e amido de mandioca apresentaram superfície externa mais uniforme e maior esfericidade. No entanto, esferas constituídas exclusivamente de alginato de sódio exibiram, em sua maioria, morfologia distorcida.

5.2.5 Eficiência de encapsulação e carregamento

A avaliação da eficiência de encapsulação e carregamento de antocianinas nas formulações contendo diferentes concentrações de fucoidano e alginato são parâmetros fundamentais, sendo que uma alta taxa de encapsulação e carregamento resulta em uma aplicação controlada do composto de interesse (Yan et al., 2025). A eficiência de encapsulação consiste na porcentagem de antocianina que foi encapsulada na esfera úmida, ou seja, não foi perdida na solução de cloreto de cálcio. Já a eficiência de carregamento pode ser definida como a relação entre a antocianina adicionada na formulação de fucoidano e alginato com a massa total das esferas liofilizadas (Pestovsky, Martinez-Antonio., 2019). Em relação à eficiência de encapsulação e carregamento (Tabela 4), não foram observadas diferenças significativas entre as formulações contendo 0,5 e 0,75% de fucoidano, que representaram valores de eficiência de encapsulação de 68,86% e 70,86% e eficiência de carregamento de 29,20% e 30,50%, respectivamente. Resultado próximo foi observado por Tavlasoglu et al., (2022), que relataram uma eficiência de encapsulação de 72,02% em esferas de alginato contendo antocianinas. Esses valores podem ser atribuídos ao aumento da concentração de fucoidano, o que pode indicar interações estáveis entre os polissacarídeos, favorecendo a encapsulação das antocianinas.

Tabela 4. Eficiência de encapsulação (esferas úmidas) e carregamento (esferas liofilizadas) de formulações de alginato 2% (p/v), antocianina 1% (p/v) e diferentes concentrações de fucoidano (p/v)

Fucoidano (%)	Eficiência (%)	
	Encapsulação	Carregamento
0	69,15 ^{ab} ± 0,25	28,26 ^a ± 0,11
0,25	63,49 ^a ± 0,24	25,27 ^a ± 0,33
0,50	68,86 ^a ± 0,00	29,20 ^a ± 0,00
0,75	70,86 ^a ± 0,00	30,50 ^a ± 0,00
1	71,20 ^b ± 2,11	41,04 ^b ± 2,32

Letras diferentes na coluna indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão ($n = 2$).

5.2.6 Solubilidade

Os valores de solubilidade (Tabela 5) revelaram uma redução da solubilidade em água das esferas contendo alginato, fucoidano e antocianinas em função do aumento da concentração de fucoidano. Os menores níveis de solubilidade foram observados nas maiores concentrações de fucoidano (0,75 e 1%). Resultados semelhantes foram apresentados por Wang et al. (2010), que verificaram que o fucoidano extraído de *Laminaria japonica* exibiu baixa solubilidade. Baixos teores de solubilidade são considerados desejáveis, pois indicam boa estabilidade coloidal do fucoidano em solução aquosa, atribuída à sua carga negativa, o que previne a agregação de partículas em meios aquosos e fisiológicos (Ostolska e Wísniwka, 2014). Além disso, a baixa solubilidade pode indicar a formação de uma rede polissacarídica mais densa entre o fucoidano, alginato, antocianinas e íons de cálcio (Gooma et al., 2018). Dependendo da aplicação, elevados ou baixos teores de solubilidade podem ser requeridos em produtos ou processos. Teores elevados de solubilidade são requeridos para aplicação em sucos instantâneos em pó, com o objetivo de obter uma consistência mais fluida (Rafiquzzaman et al., 2025). Baixos

níveis de solubilidade são desejáveis em aplicações orais, favorecendo a biodisponibilidade de antocianinas no intestino (He *et al.*, 2017). Os valores observados para as esferas contendo alginato, antocianinas e maiores concentrações de fucoidano (0,75 e 1%) sugerem maior retenção de antocianinas na matriz polimérica, dificultando sua solubilização e, conseqüentemente, levando à diminuição da solubilidade das esferas liofilizadas em meio aquoso.

Tabela 5. Solubilidade das esferas liofilizadas contendo diferentes concentrações de fucoidano, alginato 2% (p/v) e 1% (p/v) antocianinas

Fucoidano (%)	Parâmetro (%)
	Solubilidade
0	53,74 ^a ± 0,49
0,25	71,89 ^b ± 1,36
0,50	56,09 ^a ± 1,53
0,75	39,96 ^c ± 1,28
1	39,02 ^c ± 1,56

Letras diferentes na coluna indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão ($n = 2$).

5.2.7 Intumescimento

O comportamento de intumescimento das esferas preparadas com diferentes concentrações de fucoidano, alginato e antocianinas estão apresentados nas Figura 11. As propriedades de intumescimento das esferas influenciam a absorção de fluidos e a troca de substâncias bioativas em meio fisiológico (Ninan *et al.*, 2013). O aumento da taxa de intumescimento pode ser relacionado ao aumento da resistência das esferas em meio fisiológico (Sman, 2018). Todas as concentrações apresentaram aumento do intumescimento com o tempo, indicando absorção progressiva de água pela rede polimérica de alginato e fucoidano. Os maiores índices de intumescimento, ao longo de 70 min, foram verificadas nas esferas formuladas com 0,5 – 1,0 % de fucoidano. Luo *et al.* (2022) desenvolveram um curativo de hidrogel a base de gelatina de pele de tilápia, fucoidano e ácido tânico, observando aumento contínuo da taxa de intumescimento do hidrogel em pH neutro. Isso indica que as esferas preparadas com 0,5 – 1,0 % de fucoidano possuem boa estrutura de rede tridimensional e homogênea durante a reticulação, o que possibilita a esfera absorver

mais água (Luo *et al.*, 2022).

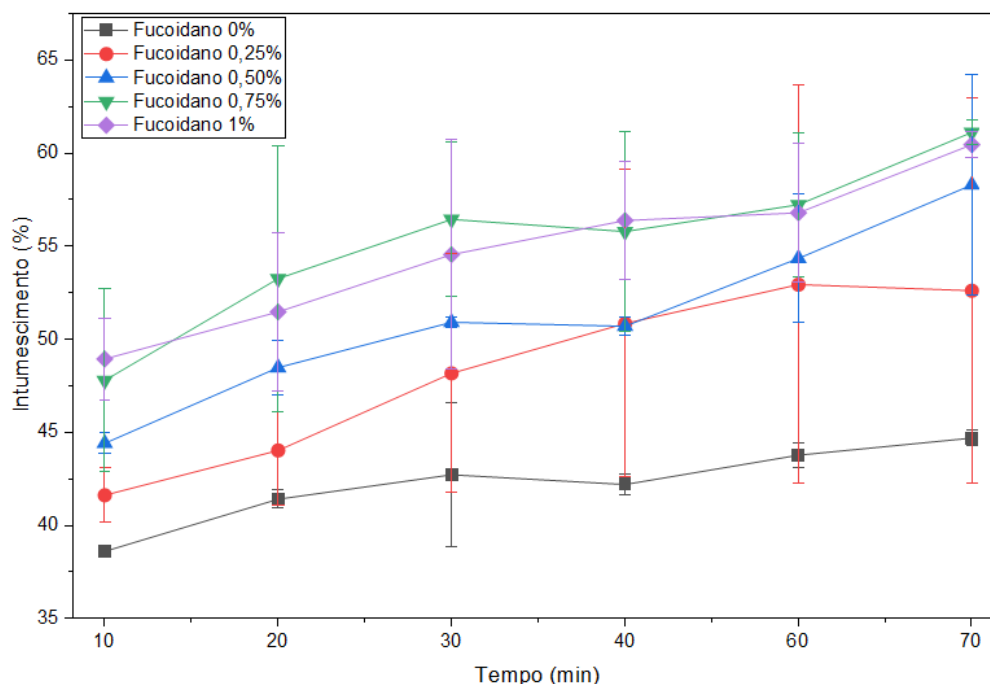


Figura 11 – Comportamento de intumescimento das esferas liofilizadas de diferentes concentrações de fucoidano, alginato e antocianina

Tabela 6. Intumescimento das esferas liofilizadas com diferentes concentrações de fucoidano, (2%) alginato e (1%) antocianinas

Fucoidano (%)	Parâmetro (min)					
	Intumescimento					
	10	20	30	40	60	70
0	38,6±0,2	41,4±0,4	42,7±3,8	42,0 ±0,5	43,7±0,6	44,6±0,4
0,25	41,6±1,4	44,0±2,9	48,1±6,4	50,8± 8,2	52,9±10,7	52,6±10,3
0,50	44,4±0,5	48,4±1,4	50,9±0,2	50,7± 0,4	54,3±3,4	58,2±5,9
0,75	47,7±4,9	53,2±7,1	56,4±4,1	55,7± 5,3	57,2±3,8	61,1±0,6
1	48,9±2,1	51,4±4,2	54,5±6,1	56,3± 3,1	56,7±3,7	60,4±0,3

Os dados são apresentados como média ± desvio padrão ($n = 2$).

5.2.8 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier com Refletância Total Atenuada (FTIR-ATR)

A análise FTIR-ATR (Figura 12) apresentou as bandas de absorção características do fucoidano, comparadas com as verificadas em estudos anteriores (Kesh *et al.*, 2024; Monla *et al.*, 2022), indicadas pelas linhas tracejadas na figura. Todas as formulações exibiram uma banda larga, característica de polissacarídeos,

em torno de $3716\text{--}2982\text{ cm}^{-1}$, correspondente às vibrações de estiramento O–H e C–H (Jain, Datta; 2016; Etoummi *et al.*, 2024). Os picos em 1258 cm^{-1} e 850 cm^{-1} , correspondem à vibração de estiramento dos grupos sulfato (S=O) do fucoidano (Reys *et al.*, 2023). Os picos verificados em $1600\text{--}1424\text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídos ao estiramento assimétrico e simétrico e às vibrações do grupo carboxílico (C=O) característicos do alginato, respectivamente (Kok; Wong, 2022). Os picos identificados em 1077 e 1022 cm^{-1} indicam o estiramento do grupo C=O nos anéis piranose e no anél do ácido algínico (Jain, Datta; 2016). O pico em 1600 cm^{-1} corresponde ao estiramento do anel aromático em antocianinas (Qin *et al.*, 2019). O pico em 1720 cm^{-1} sugere a presença de vibrações de estiramento do anel benzopirano das antocianinas (Zeng *et al.*, 2018). A formulação contendo 0,5% de fucoidano apresentou menor intensidade nos picos reportados, sugerindo interação desejável entre as moléculas, possivelmente devido a formação de ligações de hidrogênio intermoleculares (Jayashankar *et al.*, 2021).

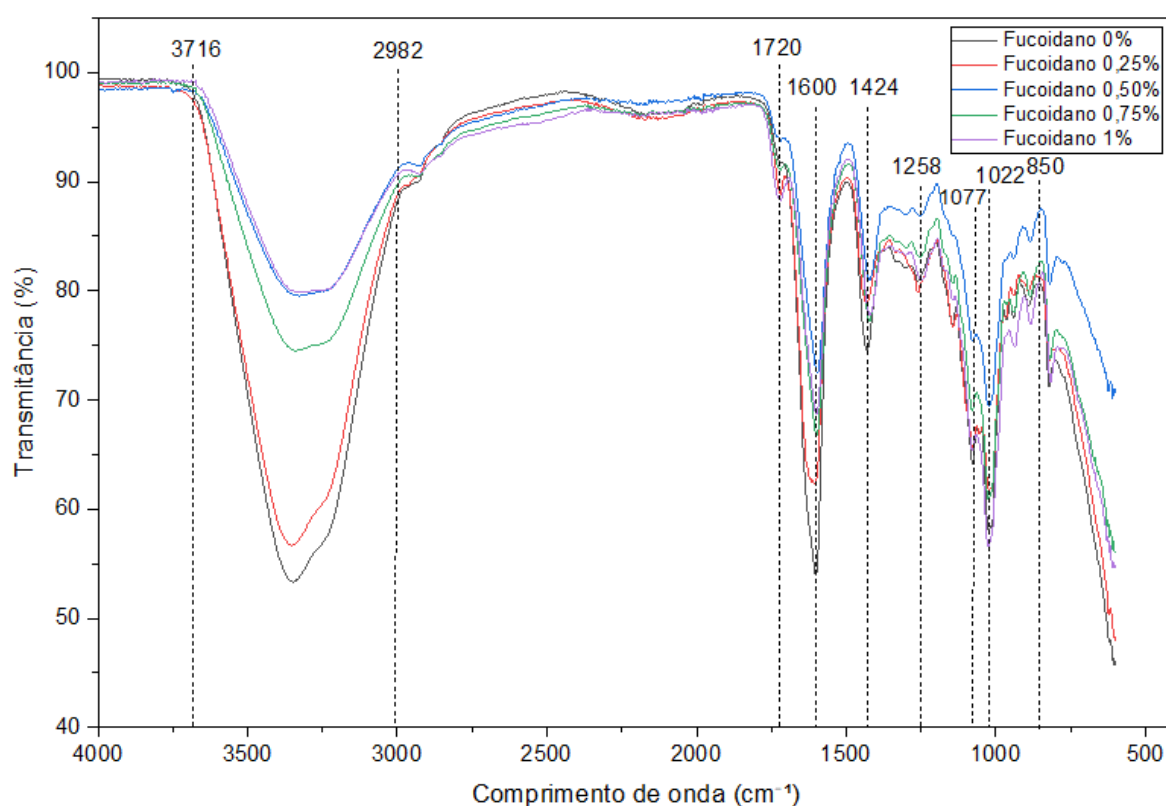


Figura 12 – Espectro FTIR-ATR das diferentes concentrações de fucoidano, alginato e antocianinas

6. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo mostram o avanço da aplicação do fucoïdano extraído da *Sargassum cymosum* C. Agardh na encapsulação de antocianinas. O extrato de amora-preta apresentou altos teores de antocianinas, preservadas após liofilização. O aumento da concentração de fucoïdano resultou em maior índice de consistência e diminuição do índice de comportamento do fluido, indicando formulações mais viscosas e pseudoplásticas. Foi observado, em todas as formulações, redução das cargas negativas em função da incorporação de fucoïdano e a presença de grupos funcionais característicos do fucoïdano, alginato e antocianinas. Confirmados pelas análises de PZ e FTIR-ATR, respectivamente.

As formulações com maiores concentrações de fucoïdano exibiram esferas com morfologia menos porosa e integridade estrutural, após a liofilização, encapsulação e carregamento de antocianinas eficientes, bem como maior capacidade de inchaço e menor solubilização em meio aquoso. Este estudo contribui para o entendimento da encapsulação de antocianinas utilizando alginato de sódio comercial e fucoïdano extraído de alga parda como materiais de parede, associados às etapas de gelificação iônica e liofilização. A formulação contendo 0,5% de fucoïdano apresentou resultados satisfatórios de análises físicas e estruturais, encapsulação eficiente e resistência ao inchaço.

REFERÊNCIAS

- Al, Y. *et al.* Molecular mechanism of different flower color formation of *Cymbidium ensifolium*. **Plant Molecular Biology**, v. 113, p. 193-204, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-023-01382-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11103-023-01382-0>. Acesso em: abr. 2026.
- ALBERT, C. *et al.* Study of Antioxidant Activity of Garden Blackberries (*Rubus fruticosus* L.) Extracts Obtained with Different Extraction Solvents. **Applied Sciences**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12084004>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/8/4004>. Acesso em: jan. 2026.
- ALHAWITI, A. S. *et al.* Construction of a biocompatible alginate-based hydrogel cross-linked by Diels–Alder chemistry for controlled drug release. **Reactive and Functional Polymers**, v. 187, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105578>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1381514823000810>. Acesso em: jan. 2026.
- ALMEIDA-LIMA, J. *et al.* Evaluating the possible genotoxic, mutagenic and tumor cell proliferation-inhibition effects of a non-anticoagulant, but antithrombotic algal heterofucan. **Journal of Applied Toxicology**, v. 30, p. 617-718, 2010. DOI: 10.1002/jat.1547708J. Disponível em: https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jat.1547?getft_integrator=sciencedirect_contenthosting&src=getft&utm_source=sciencedirect_contenthosting. Acesso em: dez. 2025.
- AMERINE, M. A.; OUGH, C. S. **Análisis de Vinos y Mostos**. Zaragoza: Acribia, 1976.
- AOAC INTERNATIONAL. **Official methods of analysis**. 17th ed. Gaithersburg, MD, USA: AOAC, 2000. Methods 925.10, 65.17, 974.24, 992.16.
- AOAC INTERNATIONAL. **Official Method 2005.02**: Total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines — pH differential method. First Action 2005. Gaithersburg, MD, USA: AOAC International, 2005.

ATTARIBO, T. *et al.* Studies on the interactional characterization of preheated silkworm pupae protein (SPP) with anthocyanins (C3G) and their effect on anthocyanin stability. **Food Chemistry**, v. 326, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126904>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814620307664>. Acesso em: abr. 2026.

AYRAPETYAN, O.N. *et al.* Antibacterial Properties of Fucoidans from the Brown Algae *Fucus vesiculosus* L. of the Barents Sea. **Biology**, v. 10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10010067>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-7737/10/1/67>. Acesso em: abr. 2026.

BARBOSA, A.N.; LIMA, S.A.C.; REIS, S. Application of pH-Responsive Fucoidan/Chitosan Nanoparticles to Improve Oral Quercetin Delivery. **Molecules**, v. 24, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24020346>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/24/2/346>. Acesso em: mai. 2026.

BAK, J.; YOO, B. Rheological characteristics of fucoidan-galactomannan mixtures. **Cellulose**, v. 32, p. 4847-4858, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06547-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-025-06547-2#citeas>. Acesso em: jan. 2026.

BROVKO, O.; PALAMARCHUCK, I.; GORSHKOVA, N.; & BOGOLITSYN, K. Physicochemical properties and compatibility of sodium alginate and fucoidan solutions. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125309>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813023022031?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

CHAN, E. *et al.* Effects of starch filler on the physical properties of lyophilized calcium–alginate beads and the viability of encapsulated cells. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, p. 225-232, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.07.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861710005874?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

CHATEPA, L. E. C.; MWAMATOPE, B.; CHIKOWE, I.; MASAMBA, K.G. Effects of solvent extraction on the phytoconstituents and in vitro antioxidant activity properties of leaf extracts of the two selected medicinal plants from Malawi. **BMC Complement Med Ther**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-024-04619-7>. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11348721/?utm_source=chatgpt.com#Sec20. Acesso em: jan. 2026.

CHAVES, Vitor Clasen. **Caracterização química de frutos vermelhos cultivados no sul do Brasil e avaliação farmacológica de extrato de *Rubus sp.* em modelo animal de mania e neuroinflamação**. 2017. 167f. Tese (Doutorado acadêmico em Biotecnologia e Biociências) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/189719/PBTC0271-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: jan. 2026.

CHEN, C.; ZHANG, H. Alginate/pectin aerogel microspheres for controlled release of proanthocyanidins. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 136, p. 936-943, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.138>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813019330569#s0010>. Acesso em: jan. 2026.

CHEN, W. *et al.* Survival Behavior of *Lactobacillus plantarum* Loaded in Alginate/Konjac Glucomannan Composite Beads Under Storage and Gastrointestinal Conditions. **Food Science and Nutrition**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.71322>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fsn3.71322>. Acesso em: jan.2026.

DE SOUZA, V.B.; THOMAZINI, M.; BALIEIRO, J.C.C.; TRINDADE-FÁVARO, C.S. Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*). **Food and Bioproducts Processing**, v.93, p. 39-50, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.11.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308513001053?via%3Dihub>. Acesso em: jan.2026.

DE SOUZA, V. R. *et al.* Determination of the bioactive compounds, antioxidant activity and chemical composition of Brazilian blackberry, red raspberry, strawberry,

blueberry and sweet cherry fruits. **Food Chemistry**, v. 156, p. 362-368, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.125>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.125>. Acesso em: jan. 2026.

DONG, S. et al. Factors influencing the adhesive behavior of carboxymethyl cellulose-based hydrogel for food applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 179, p. 398-406, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813021005444>. Acesso em: abr. 2026.

EL-SHEEK, M. et al. Fucoidan and alginate from brown seaweeds: extraction, structural diversity, biocompatibility, biodegradability, and biomedical applications. **Frontiers in Plant Science Plant Biotechnology**, v. 17, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1845395>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2026.1845395/full#s8>. Acesso em: jun. 2026.

ETTOUMI, F.; HUANG, H.; XU, Y.; WANG, L.; RU, Q.; HUB, Y.; ZOU, L.; LUO, Z. Supramolecular assembly of dual crosslinked nanocomposite polysaccharides hydrogel: Integration of injectable, self-healing, and pH-responsive platform for sustained delivery of polyphenols. **Food Hydrocolloids**, v. 154, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110108>. Disponível em: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268005X24003825. Acesso em: jan. 2026.

FERNANDO, S. et al. Advances in functionalizing fucoidans and alginates (bio)polymers by structural modifications: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 355, p. 33-48, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.115>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894718315894?via%3Dihub#b0030>. Acesso em: dez. 2025.

FLÓREZ-FERNÁNDEZ, N. et al. Fucoidan from *Fucus vesiculosus*: Evaluation of the Impact of the Sulphate Content on Nanoparticle Production and Cell Toxicity. **Marine Drugs**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/md21020115>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-3397/21/2/115>. Acesso em: jan. 2026.

FRAISSE, D.; BRED A.; FELGINES, C.; SENEJOUX, F. Stability and Antglycoxidant Potential of Bilberry Anthocyanins in Simulated Gastrointestinal Tract Model. **Foods**, v. 9, 2020. DOI: 10.3390/foods9111695. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33228062/>. Acesso em: abr. 2026.

FU, W.; LI, S.; HELMICK, H.; HAMAKER, B. R.; KOKINI, J. L.; REDDIVARI, L. Complexation with Polysaccharides Enhances the Stability of Isolated Anthocyanins. **Foods**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12091846>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/9/1846>. Acesso em: jan. 2026.

GAMBUTI, A. *et al.* Oxygen exposure of tannins-rich red wines during bottle aging. Influence on phenolics and color, astringency markers and sensory attributes. **European Food Research and Technology**, v. 243, p. 669-680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2780-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00217-016-2780-3#citeas>. Acesso em: abr. 2026.

GARAZHIAN, M.; GHARAGHANI, A.; ESHGHI, S. Genetic diversity and inter-relationships of fruit bio-chemicals and antioxidant activity in Iranian wild blackberry species. **Scientific Reports**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75849-1>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-75849-1#Sec6>. Acesso em: jan. 2026.

GILIOME, J.; du TOIT, L. C.; KLUMPERMAN, B. & CHOONARA, Y. E. Investigation of the 3D Printability of covalently cross-linked polypeptide-based hydrogels. **ACS omega**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05873>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c05873>. Acesso em: jan. 2026.

GOMAA, M.; FAWZY, M. A.; HIFNEY, A. F.; ABDEL-GAWAD, K. M. Use of the brown seaweed *Sargassum latifolium* in the design of alginate-fucoidan based films with natural antioxidant properties and kinetic modeling of moisture sorption and polyphenolic release. **Food Hydrocolloids**, v. 82, p. 64-72, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.053>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X18300997?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

GUO, X.; YE, X.; SUN, Y.; WU, D.; WU, N.; HU, Y.; CHEN, S. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure, and antioxidant activity of sea cucumber fucoidan.

Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 62, p. 1088-1095, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1021/jf404717y>. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf404717y>. Acesso em: jan. 2026.

HE, B. et al. Loading of anthocyanins on chitosan nanoparticles influences anthocyanin degradation in gastrointestinal fluids and stability in a beverage. **Food Chemistry**, v. 221, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.120>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030881461631799X?via%3Dihub>.

Acesso em: jul. 2026.

HUANG, G. et al. Fucoidan enhances stability of gelatin/anthocyanin-based oleogels via hydrogen-bonded crosslinking. **Food Chemistry: X**, v. 30, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102909>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590157525007564?via%3Dihub>.

Acesso em: dez. 2025.

HURTADO, A.; ALJABALI A.A.A.; MISHRA, V.; TAMB UWALA, M.M.; SERRANO-AROCA.; A. Alginate: Enhancement Strategies for Advanced Applications.

International Journal of Molecular Sciences, v. 23, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ijms23094486>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/9/4486>. Acesso em: abr. 2026.

JAYASHANKAR, T.; PING, M.K.X.; ZHI, H.W.; YUSOP, N.; GHAZALLI.; Preparation and characterisations of alginate-agarose polymeric hydrogel for potential stem cell delivery. **Journal of Polymer Science and Technology**, v. 6, p. 11-22, 2021.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/352438943_PREPARATION_AND_CHARACTERISATIONS_OF_ALGINATE-AGAROSE_POLYMERIC_HYDROGEL_FOR_POTENTIAL_STEM_CELL_DELIVERY. Acesso em: mai. 2026.

JAIN, S.; DATTA, M. Montmorillonite-alginate microspheres as a delivery vehicle for oral extended release of Venlafaxine hydrochloride. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 33, p. 149-156, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jddst.2016.04.002>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1773224716301447>. Acesso em:
 abr. 2026.

JEYARAJ, E.J.; LIM, Y.Y.; CHOO, W.S. Extraction methods of butterfly pea (*Clitoria ternatea*) flower and biological activities of its phytochemicals. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, p. 2054-2067, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1007/s13197-020-04745-3>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-020-04745-3>. Acesso em: jan. 2026.

JIANG, M.; ZHANG, Y. Biopolymer-based encapsulation of anthocyanins as reinforced natural colorants for food applications. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100488>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154322002216?via%3Dihub>. Acesso em: abr. 2026.

JUNIOR, E.N.M. *et al.* Stability Kinetics of Anthocyanins of Grumixama Berries (*Eugenia brasiliensis* Lam.) during Thermal and Light Treatments. **Foods**, v. 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12030565>. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/2304-8158/12/3/565>. Acesso em: abr. 2026.

KAVOOSI, G.; DERAKHSHAN, M.; SALEHI, M.; RAHMATI, L. Microencapsulation of zataria essential oil in agar, alginate and carrageenan. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 45, p. 418-425, 2018. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.12.010>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856417309943?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

KESH, A.A. *et al.* Effect of green and sustainable extracted fucoidan polysaccharide as a corrosion inhibitor in 3.5% NaCl. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, p. 28219-28232, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03579-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-022-03579-7#Sec13>. Acesso em: abr. 2026.

KJESBU, J.S. *et al.* Physical-mechanical properties of fucoidan-alginate composite hydrogels. **Carbohydrate Polymers**, v. 378, 2026. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2026.125007>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861726001232#ab0005>.
 Acesso em: mai. 2026.

KOK, J.M.L. In vitro Properties of Methanol Extract and Sodium Alginate of *Sargassum polycystum* C. Agardh Brown Seaweed Collected from Malaysia. **Tropical Life**, v. 33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21315/tlsr2022.33.1.4>. Disponível em: https://ejournal.usm.my/tlsr/article/view/tlsr_vol33-no-1-2022_4. Acesso em: mai. 2026.

KO, A.; LEE, J.; NAM, H.S.; LEE, H.G. Stabilization of Black Soybean Anthocyanin by Chitosan Nanoencapsulation and Copigmentation. **Journal of Food Biochemistry**, v. 41, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfbc.12316>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfbc.12316>. Acesso em: abr. 2026.

LAMEIRO, M.; MACHADO, M. I.; HELBIG, E.; ZAMBIAZI, R. Características físico-químicas das polpas de amora-preta (*rubus spp.*) e de mirtilo (*vaccinium ashei* reade). **XIII ENPOS**, 2011. Disponível em: https://www2.ufpel.edu.br/enpos/2011/anais/pdf/CA/CA_00339.pdf. Acesso em: jan. 2026.

LEE, J.Y.; JO, Y.; SHIN, H.; LEE, J.; CHAE, S. U.; BAE, S. K.; NA, K. Anthocyanin-fucoidan nanocomplex for preventing carcinogen induced cancer: Enhanced absorption and stability. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 586, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119597> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378517320305810?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

LI, Y. *et al.* Study on swelling and drug releasing behaviors of ibuprofen-loaded bimetallic alginate aerogel beads with pH-responsive performance. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 205, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111895>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776521003398#sec0045>. Acesso em: jan.2026.

LIU, Y.; TONG Y.; TONG, Q.; XU, W.; WANG, Z. Effects of sunflower pectin on thermal stability of purple sweet potato anthocyanins at different pH. **International**

Journal of Biological Macromolecules, v. 253, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126663>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813023035602>. Acesso em: abr. 2026.

LU, Y. *et al.* A fucoidan-gelatin wound dressing accelerates wound healing by enhancing antibacterial and anti-inflammatory activities. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 223, p. 36-48, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.255>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813022025107#s0070>
Acesso em: mai. 2026.

LUO, Y.; WANG, Q.; ZHANG, Y. Biopolymer-Based Nanotechnology Approaches to Deliver Bioactive Compounds for Food Applications: A Perspective on the Past, Present, and Future. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, p. 12993-13000, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00277>. Disponível em:

https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.0c00277?src=getftr&utm_source=sciencedirect_contenthosting&getft_integrator=sciencedirect_contenthosting. Acesso em: abr. 2026.

LUO, Y.; ZHU, X.; HU, C.; LI, P.; ZHAO, M.; LU, J.; XIA, G. A fucoidan-gelatin wound dressing accelerates wound healing by enhancing antibacterial and anti-inflammatory activities. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 223, p. 36-48, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.255>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813022025107#s0070>.
Acesso em: abr. 2026.

MA, J.; HE, X.; WANG L.; PANG, J. Magnetic fucoidan aerogel microspheres: Cationic drug loading kinetics and electrostatic-magnetic synergy. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 726, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137843>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775725017467>. Acesso em: abr. 2026.

MA, Z.; CHENG, J.; JIAO, S.; JING, P. Interaction of mulberry anthocyanins with soybean protein isolate: effect on the stability of anthocyanins and protein in vitro digestion characteristics. **International Journal of Food Science and Technology**,

v. 57, p. 2267-2276, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15576>. Disponível em: <https://academic.oup.com/ijfst/article/57/4/2267/7807870?guestAccessKey=>. Acesso em: abr. 2026.

MAHDAVI, S.A.; JAFARI S.M.; GHORBANI M.; ASSADPOOR, E. Spray-Drying Microencapsulation of Anthocyanins by Natural Biopolymers: A Review. **Drying Technology**, v. 32, p. 509-518, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.839562>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2013.839562#d1e304>. Acesso em: dez. 2025.

MAJIMBI, M. *et al.* Sodium alginate microencapsulation improves the short-term oral bioavailability of cannabidiol when administered with deoxycholic acid. **Plos One**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243858>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0243858>. Acesso em: jan. 2026.

MEMETE, A. *et al.* Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Several Blackberry (*Rubus spp.*) Fruits Cultivars Grown in Romania. **Horticulturae**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050556>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/5/556>. Acesso em: jan. 2026.

MIRKOVIC, D. *et al.* Evaluation of the impact of critical quality attributes and critical process parameters on quality and stability of parenteral nutrition nanoemulsions. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 39, p. 341-347, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.04.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1773224716305925?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

MOHAMMADALINEJHAD, S.; KUREK, M.A. Microencapsulation of Anthocyanins—Critical Review of Techniques and Wall Materials. **Applied Sciences**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093936>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/9/3936>. Acesso em: dez. 2025.

MOHAMMADALINEJHAD, S. *et al.* The potential of anthocyanin-loaded alginate hydrogel beads for intelligent packaging applications: Stability and sensitivity to volatile amines. **Current Research in Food Science**, v. 7, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100560>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665927123001284#sec4>. Acesso em: mai. 2026.

MONLA, R.A.; DASSOUKI, Z.; SARI-CHMAYSEM, N.; MAWLAWI, H.; GALI-MUHTASBI, H. Fucoidan and Alginate from the Brown Algae *Colpomenia sinuosa* and Their Combination with Vitamin C Trigger Apoptosis in Colon Cancer.

Molecules, v. 27, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27020358>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/2/358>. Acesso em: abr. 2026.

MONTEIRO, F. S. **Obtenção de suco de amora-preta (*rubus spp.*) concentrado em antocianinas utilizando processos de separação por membranas**. 2011. 135f. Dissertação (Mestrado acadêmico em Engenharia de alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/906073/1/TS-0800.pdf?>. Acesso em: jan. 2026.

MOURA, S. *et al.* Release of anthocyanins from the hibiscus extract encapsulated by ionic gelation and application of microparticles in jelly candy. **Food Research International**, v. 121, p. 542-552, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.010>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996918309578>. Acesso em: dez. 2025.

NALIYADHARA, N.; TRUJILLO, F. Advancements in atmospheric freeze-drying: Innovations, technology integration, quality and sustainability implications for food preservation. **Journal of Food Engineering**, v. 386, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112273>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087742400339X>. Acesso em: abr. 2026.

NETRAVATI. *et al.* Comparative evaluation of anthocyanin pigment yield and its attributes from Butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) flowers as prospective food colorant using different extraction methods. **Future Foods**, v. 6, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100199>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666833522000867>. Acesso em: jan. 2026.

NINAN, N.; MUTHIAH, M.; PARK, I.; ELAIN, A.; THOMAS, S.; GROHENS, Y. Pectin/carboxymethyl cellulose/microfibrillated cellulose composite scaffolds for tissue engineering. **Carbohydrate Polymers**, v. 98, p. 877-885, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.06.067>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861713006632>. Acesso em: abr. 2026.

OKAWA, S.; SUMIMOTO, Y.; MASUDA, K.; OGAWARA, K.; MARUYAMA, M.; HIGAKI, K. Improvement of lipid solubility and oral bioavailability of a poorly water- and poorly lipid-soluble drug, rebamipide, by utilizing its counter ion and SNEDDS preparation. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 159, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.105721>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928098721000233>. Acesso em: abr. 2026.

OLIVARES, A.; SILVA, PAULINA. Viability dataset on microencapsulated probiotics: Sodium alginate viscosity effect. **Data in Brief**, v. 27, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104735>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234091931090X>. Acesso em: jan. 2026.

OSTOLSKA, I & WISNIEWSKA. Application of the zeta potential measurements to explanation of colloidal Cr₂O₃ stability mechanism in the presence of the ionic polyamino acids. **Colloid and Polymer Science**, v. 292, p. 2453-2464, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00396-014-3276-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00396-014-3276-y>. Acesso em: abr. 2026.

OZKAN, G.; FRANCO, P.; MARCO I.D.; XIAO, J.; CAPANOGLU E. A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. **Food Chemistry**, v. 272, p. 494-506, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814618313669>. Acesso em: dez. 2025.

PAIBOON, N. *et al.* Internal gelation of alginate microparticle prepared by emulsification and microfluidic method: Effect of Ca-EDTA as a calcium source. **Food Hydrocolloids**, v. 141, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108712>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X23002588?via%3Dihub#bib28>. Acesso em: dez. 2025.

PANG, Z.; LUO, Y.; LI, B.; ZHANG, M.; LIU, X. Effect of different hydrocolloids on tribological and rheological behaviors of soymilk gels. **Food Hydrocolloids**, v. 101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105558>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X19315498?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

PATHAK, T. S.; YUN, J.; LEE, J.; PAENG, K. Effect of calcium ion (cross-linker) concentration on porosity, surface morphology and thermal behavior of calcium alginates prepared from algae (*Undaria pinnatifida*). **Carbohydrate Polymers**, v. 81, p. 633-639, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861710001943>. Acesso em: jan. 2026.

PATRA, A.; BRUNTON, N.P.; O'DONNELL, C.; TIWARI, B.K. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224409002271>. Acesso em: abr. 2026.

PAWAR, S.N.; EDGAR, K. J. Alginate derivatization: A review of chemistry, properties and applications. **Biomaterials**, v. 33, p. 3279-3305, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.01.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961212000117>. Acesso em: dez. 2025.

PESTOVSKY, Y. S.; MARTÍNEZ-ANTONIO, A. The Synthesis of Alginate Microparticles and Nanoparticles. **Drug Designing and Intellectual Properties International Journal**, vol. 3, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.32474/DDIPIJ.2019.03.000155>. Disponível em: https://lupinepublishers.com/drug-designing-journal/fulltext/the-synthesis-of-alginate-microparticles-and-nanoparticles.ID.000155.php?utm_. Acesso em: jan. 2026.

PINTO, V.S. *et al.* Co-encapsulation of *Lactobacillus acidophilus* and different concentrations of chia oil (*Salvia hispanica* L.) by external ionic gelation. **Food Hydrocolloids**, v. 164, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111171>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X25001316#bib48>.

Acesso em: abr. 2026.

QIN, Y. *et al.* Preparation and characterization of active and intelligent packaging films based on cassava starch and anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr.

Biological Macromolecules, v. 134, p. 80-90, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.029>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813019316721?via%3Dihub>.

Acesso em: mai. 2026.

QIU, L.; ZHANG, M.; ADHIKARI, B.; CHANG, L. Microencapsulation of Rose Essential Oil Using Perilla Protein Isolate-Sodium Alginate Complex Coacervates and Application of Microcapsules to Preserve Ground Beef. **Food and Bioprocess Technology**, v. 16, p.368-381, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02944-8> disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-022-02944-8>. Acesso em: mai. 2026.

RAFIQUZZAMAN, M. *et al.* Freeze-Dried Instant Juice Powders from Guava, Amla, and Jamun: Evaluation of Physicochemical Properties, Bioactive Compounds, and Consumer Acceptance. **Food Science and Nutrition**, v. 13, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1002/fsn3.70374>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fsn3.70374>. Acesso em: jul. 2026.

RAMOS-DE-LA-PEÑA, A.N; CONTRERAS-ESQUIVEL, J.C.; AGUILAR, O.; GONZÁLEZ-VALDEZ, J. Structural and bioactive roles of fucoidan in nanogel delivery systems. A review. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100235>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666893922000536>. Acesso em: abr. 2026.

REMINI, H.; DAHMOUNE, F.; SAHRAOUI, Y.; MADANI K.; KAPRANOV, V.N.; KISELEV, E.F. Recent advances on stability of anthocyanins. **RUND Journal of**

Agronomy and Animal Industries, v. 13, p. 257-286, 2018. DOI: 10.22363/2312-797X-2018-13-4-257-286. Disponível em: <https://cyberleninka.ru/article/n/recent-advances-on-stability-of-anthocyanins/viewer>. Acesso em: abr. 2026.

RESVANKHAH, A.; EMAM-DJOMEH, Z.; ASKARI, G. Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. **Drying Technology**, v. 38, p. 235-258, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1653906>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2019.1653906#abstract>. Acesso em: dez. 2025.

REYS, L. L.; Silva, S. S.; SOARES DA COSTA, D.; RODRIGUES, L. C.; REIS, R. L. & Silva, T. H. Building Fucoidan/Agarose-Based Hydrogels as a Platform for the Development of Therapeutic Approaches against Diabetes. **Molecules**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28114523>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/11/4523>. Acesso em: jan. 2026.

ROCHA, J.C.G. *et al.* Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts. **Powder Technology**, v. 343, p. 317-325, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018309446>. Acesso em: abr. 2026.

SARIBURUN, E. *et al.* Phenolic Content and Antioxidant Activity of Raspberry and Blackberry Cultivars. **Journal of food science**, v. 75, p. C328-C335, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01571.x>. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1750-3841.2010.01571.x>. Acesso em: dez. 2025.

SENDRI, N.; SINGH, S.; SHARMA, B.; PUROHIT, R.; BHANDARI P. Effect of co-pigments on anthocyanins of *Rhododendron arboreum* and insights into interaction mechanism. **Food Chemistry**, v. 426, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136571>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814623011895>. Acesso em: abr. 2026.

SHU, J. *et al.* Effect of internal and external gelation on the physical properties, water distribution, and lycopene encapsulation properties of alginate-based emulsion gels.

Food Hydrocolloids, v. 139, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108499>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X23000450?via%3>. Acesso em: jan. 2026.

SONG, X.; CHIOU, B. S.; XIA, Y.; CHEN, M.; LIU, F & Zhong, F. The improvement of texture properties and storage stability for kappa carrageenan in developing vegan gummy candies. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.102, p.3693-

3702, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11716>. Disponível

em:<https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.11716> Acesso em: jan. 2026.

SRIAMORNSAK, P. *et al.* Alginate-based pellets prepared by

extrusion/spheronization: Effect of the amount and type of sodium alginate and

calcium salts. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 69, p. 274-284, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2007.09.012>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0939641107003232?via%3Dihub>. Acesso em: mai. 2026.

STOICA, R. *et al.* Sustainable Recovery of Anthocyanins and Other Polyphenols from Red Cabbage Byproducts. **Foods**, v. 12, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.3390/foods12224157>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/22/4157>. Acesso em: abr. 2026.

SUÁREZ, N.F. *et al.* Consumer profile: blackberry processing with different types of sugars. **Food Science and Technology**, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1590/fst.23020>. Disponível em:

<https://repositorio.ufla.br/server/api/core/bitstreams/a492b631-d5df-40f7-8be3-b1e8957e910d/content>. Acesso em: jan. 2026.

SULTANA, M.; CHAN, E.; PUSHPAMALAR, J.; CHOO, W.S. Advances in extrusion-dripping encapsulation of probiotics and omega-3 rich oils. **Trends in Food Science & Technology**, v. 123, p. 69-86, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.006>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224422000917?via%3Dihub>. Acesso em: abr. 2026.

TAVLASOGLU, M.; OZKAN, G.; CAPANOGLU, E. Entrapment of Black Carrot Anthocyanins by Ionic Gelation: Preparation, Characterization, and Application as a Natural Colorant in Yoghurt. *ACS Omega*, v. 7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03962>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c03962>. Acesso em: jul. 2026.

TAO, W. *et al.* Tailored zein-polysaccharide nanoparticles for anthocyanin encapsulation: Insights into preparation and characterization. **Food Hydrocolloids**, v. 166, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111365>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X2500325X?via%3Dihub>. Acesso em: jan. 2026.

THUY, N. M.; BEN, T.C.; MINH, V.Q.; TAI, N.G. Effect of extraction techniques on anthocyanin from butterfly pea flowers (*Clitoria ternatea* L.) cultivated in Vietnam. **Journal of Applied Biology & Biotechnology**, v. 9, p.173-180, 2021. DOI: 10.7324/JABB.2021.96022. Disponível em: https://jabonline.in/abstract.php?article_id=625&sts=2. Acesso em: jan. 2026.

TOPRAKÇI, G.; TOPRAKÇI, I.; ŞAHİN, S. Alginate Microbeads for Trapping Phenolic Antioxidants in Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.): Multivariate Optimization Based on Bioactive Properties and Morphological Measurements. **Gels**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels11030172>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2310-2861/11/3/172>. Acesso em: jan.2026.

TORRES, M.D. *et al.* Fucoidans: The importance of processing on their anti-tumoral properties. **Algal Research**, v. 45, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101748>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926419307180?via%3Dihub>. Acesso em: dez. 2025.

VAN DER SMAN, R.G.M. Theoretical investigation of the swelling of polysaccharide microgels in sugar solutions. **Royal Society of Chemistry**, v. 9, p. 2716-2724, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8FO00452H>. Disponível em:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/fo/c8fo00452h>. Acesso em: abr. 2026.

WANG, J.; ZHANG, Q.; ZHANG, Z.; SONG, H.; LI, P. Potential antioxidant and anticoagulant capacity of low molecular weight fucoidan fractions extracted from *Laminaria japonica*. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 46, p. 6-12, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.10.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813009002384>. Acesso em: abr. 2026.

WANG, N.; TIAN, J.; WANG, L.; SONG, S.; AI, C.; JANASWAMY, S.; WEN, C. Fucoidan hydrogels induced by κ -carrageenan: Rheological, thermal and structural characterization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.191, p.514-520, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.111>. Disponível em: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813021020389. Acesso em: jan. 2026.

WON, D.; BAK, J.; YOO, B. Effect of Fucoidan on Rheological and Tribological Properties of Milk Protein Isolate. **Food biophysics**, v. 20, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11483-025-10048-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11483-025-10048-x#citeas>. Acesso em: jan. 2026.

WU, B. *et al.* The influence of $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$ weight ratio on the physicochemical properties and in vitro digestion behavior of resveratrol-loaded Pickering emulsions encapsulated in alginate/ κ -carrageenan hydrogel beads. **Reactive and Functional Polymers**, v. 181, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105414>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1381514822002590?via%3Dihub> Acesso em: mai. 2026.

XI, X.; WEI, Z.; XU, Y.; XUE, C. Clove Essential Oil Pickering Emulsions Stabilized with Lactoferrin/Fucoidan Complexes: Stability and Rheological Properties. **Polymers**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081820>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/8/1820>. Acesso em: jan. 2026.

XIA, H.; WANG, X.; LI, J.; LI, J.; MAN, J. Fabrication of Ca-alginate microspheres by diffusion-induced gelation in double emulsion droplets for oral insulin. *International*

Journal of Biological Macromolecules, v. 277, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134141>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024049468?via%3Dihub>.

Acesso em: jan. 2026.

XUE, H. *et al.* Factors affecting the stability of anthocyanins and strategies for improving their stability: A review. **Food Chemistry: X**, v. 24, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101883>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590157524007715#bb0030>.

Acesso em: abr. 2026.

XU, W. *et al.* Preparation and characterization of tea oil powder with high water solubility using Pickering emulsion template and vacuum freeze-drying. **LWT**, v. 160, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113330>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822002651#sec2>. Acesso em: jan. 2026.

XU, Z. *et al.* Phenolics in wines II: progress in research on copigmentation and bioactivities. **Food Science**, v. 40, p. 284-294, 2019. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180916-160. Disponível em:

<https://www.spkx.net.cn/EN/abstract/abstract48759.shtml>. Acesso em: abr. 2026.

YAMASHITA, C. *et al.* Extraction and modification of brown algae-derived sodium alginate by ozonation: Characterization and behavior at different pH levels. **Algal Research**, v. 90, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104277>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926425003881?via%3Dihub#s0010>. Acesso em: jan. 2026.

YAMASHITA, C. *et al.* Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus spp.*) by-product extract by freeze-drying. **LWT**, v. 84, p. 256-262, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.063>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364381730378X> Acesso em: jan. 2026.

YANG, J.; CHEN, S.; FANG, Y. Viscosity study of interactions between sodium alginate and CTAB in dilute solutions at different pH values. **Carbohydrate**

Polymers, v. 75, p. 333-337, 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.07.037>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861708003433?via%3Dihub>.

Acesso em: jan. 2026.

YANG, S. *et al.* Investigation on the biological activity of anthocyanins and polyphenols in blueberry. **Food Science**, v. 86, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1111/1750-3841.15598>. Disponível em:

<https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1750-3841.15598>. Acesso em: abr. 2026.

YAN, D.; PAN, Y.; CAI, P.; XIAO, H. Redox/pH dual-responsive sodium alginate/cassava starch composite hydrogel beads for slow release of insecticides.

Reactive and Functional Polymers, v. 215, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106389>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138151482500241X>. Acesso em: jan. 2026.

YING, F.; DAI J.; XINGWEI, H.; XU, L. Study on Physicochemical Properties, Biological Activity and Structural Properties of Soluble Dietary Fiber from Sweet Potato Residue Modified by Ultrasound Combined with Enzyme and its Effect on the Stability of Anthocyanin in Beverage. **SSRN**, 2024. DOI:

<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5048913>. Disponível em:

<https://ssrn.com/abstract=5048913>. Acesso em: abr. 2026.

YU, S.H. *et al.* Preparation of fucoidan-shelled and genipin-crosslinked chitosan beads for antibacterial application. **Carbohydrate Polymers**, v. 126, p. 97-107,

2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.02.068>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861715002131>. Acesso em: dez. 2025.

ZENG, Y. *et al.* Purification of anthocyanins from saskatoon berries and their microencapsulation in deep eutectic solvents. **LWT**, v. 95, p. 316-325, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.087>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364381830402X?via%3Dihub>. Acesso em: mai. 2026.

ZENG, Y.; GUO, D.; LI, X.; CAI, D.; SUN, J.; BAI, W. Progress in research on the structure and properties of pyranoanthocyanins. **Food Science**, v. 43, p. 199-209, 2022. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20210517-205. Disponível em: <https://www.spkx.net.cn/EN/10.7506/spkx1002-6630-20210517-205>. Acesso em: abr. 2026.

ZHANG, R. *et al.* Microencapsulation of anthocyanins extracted from grape skin by emulsification/internal gelation followed by spray/freeze-drying techniques: Characterization, stability and bioaccessibility. **LWT**, v. 123, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109097>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643820300852>. Acesso em: abr. 2026.

ZHANG, Y.; GUO, Y.; LIU, FENG.; LUO, Y. Recent development of egg protein fractions and individual proteins as encapsulant materials for delivery of bioactives. **Food Chemistry**, v. 403, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134353>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814622023159>. Acesso em: abr. 2026.

ZHANG, Y.; LI, Y. Comparison of physicochemical and mechanical properties of edible films made from navy bean and corn starches. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10772>. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.10772>. Acesso em: abr. 2026.

ZHANG, Y. *et al.* Investigation on ionic cross-linking of alginate by monovalent cations to fabrication alginate gel for biomedical application. **Reactive and Functional Polymers**, v. 183, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105484>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1381514822003297?via%3Dihub>. Acesso em: mai. 2026.

ZHANG, Z. *et al.* An updated review on the stability of anthocyanins regarding the interaction with food proteins and polysaccharides. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, p. 4378-4401, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13026>. Disponível em:

<https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1541-4337.13026>. Acesso em: abr. 2026.

ZHAO, X. *et al.* Facile synthesis of nano-nanocarriers from chitosan and pectin with improved stability and biocompatibility for anthocyanins delivery: An in vitro and in vivo study. **Food Hydrocolloids**, v. 109, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106114>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X20305257>. Acesso em: abr. 2026.

ZHU, Y.; BHANDARI, B.; PANG, Z.; LIU, X.; PRAKASH, S. Protein concentration and hydrocolloid effect on the rheological and tribological behaviour of resulting protein solution. **LWT**, v. 100, p. 150-157, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.042>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643818308880>. Acesso em: jan. 2026.