

MODELAGEM MATEMÁTICA DA EXTRAÇÃO E MICROENCAPSULAÇÃO DE BETALAÍNAS DO FIGO-DA-ÍNDIA (*OPUNTIA SPP.*): POTENCIAL PARA APLICAÇÃO EM ALIMENTOS

Williany Gomes Leal¹, Benício Lins de Lima², Maria Paula Lopes dos Anjos³, Aline Roberta de Assis⁴

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil (willianyneves@gmail.com)

²Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, Brasil

³Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, Brasil

⁴Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, Brasil

Resumo: O estudo modelou a extração e microencapsulação de betalaínas da casca do figo-da-índia (*Opuntia spp.*) como corante alimentar natural. A extração ultrassônica alcançou 42,7 mg g⁻¹. A microencapsulação por *spray drying* com maltodextrina e goma arábica obteve 89,5% de eficiência e ampliou a meia-vida dos pigmentos de 33 para 87 dias, comprovando estabilidade e viabilidade tecnológica. Os resultados indicam o potencial da casca como fonte sustentável de pigmentos naturais.

Palavras-chave: Delineamento experimental; Estabilidade oxidativa; Espectrofotometria UV-Vis; Micropartículas; Resposta de superfície.

INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os sistemas alimentares globais, impulsionada pelo aumento populacional e pelas mudanças nos padrões de consumo, tem intensificado a busca por soluções mais sustentáveis, seguras e inovadoras na produção de alimentos (FAO, 2018).

Nesse cenário, destaca-se a necessidade de substituição de aditivos sintéticos por alternativas naturais, especialmente no que se refere aos corantes alimentícios, amplamente utilizados para melhorar a aceitação sensorial dos produtos. Paralelamente, consumidores têm demonstrado maior preocupação com os impactos à saúde associados ao consumo de compostos artificiais, o que tem impulsionado a indústria a investir em ingredientes naturais com propriedades funcionais (Cheek *et al.*, 2020).

Dentre os compostos naturais de interesse, as betalaínas têm se destacado como pigmentos hidrossolúveis capazes de conferir colorações que variam do amarelo ao vermelho-violeta, além de apresentarem elevada capacidade antioxidante (Martinez *et al.*, 2024).

Esses pigmentos, encontrados principalmente em espécies da ordem Caryophyllales, vêm sendo amplamente estudados devido ao seu potencial de aplicação como corantes naturais funcionais. Além de sua função tecnológica, as betalaínas estão

associadas a benefícios à saúde, como atividade anti-inflamatória e proteção contra o estresse oxidativo, o que amplia seu valor agregado na formulação de alimentos (Smeriglio *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o figo-da-índia (*Opuntia spp.*) destaca-se como uma matéria-prima promissora para a obtenção de betalaínas, especialmente em regiões semiáridas, onde sua produção é favorecida pelas condições climáticas adversas. Embora a polpa do fruto seja tradicionalmente utilizada, a casca representa uma fração significativa do resíduo gerado durante o processamento, podendo corresponder a até metade da massa total. Estudos recentes indicam que essa fração residual apresenta elevada concentração de compostos bioativos, incluindo pigmentos e fenólicos, configurando-se como uma alternativa viável para a valorização de subprodutos agroindustriais e promoção da economia circular (Smirani *et al.*, 2025; Oktay *et al.*, 2023).

Entretanto, apesar do elevado potencial das betalaínas, sua aplicação na indústria alimentícia ainda é limitada devido à sua instabilidade frente a fatores ambientais, como pH, temperatura, luz e presença de oxigênio. Essas condições promovem a degradação dos pigmentos, resultando na perda de cor e de propriedades funcionais, o que compromete sua utilização em alimentos processados (Morales *et al.*, 2021).



Diante dessas limitações, a otimização dos processos de extração torna-se fundamental para garantir maior eficiência na recuperação das betalaínas e manutenção de sua integridade estrutural. Técnicas emergentes, como a extração assistida por ultrassom e micro-ondas, têm sido amplamente investigadas por sua capacidade de aumentar o rendimento, reduzir o tempo de processamento e minimizar o uso de solventes (Vázquez-Espinosa *et al.*, 2022).

Além disso, a aplicação de ferramentas de modelagem matemática, como delineamentos fatoriais e metodologia de superfície de resposta, permite compreender a influência das variáveis operacionais e estabelecer condições ótimas de processo, contribuindo para a reprodutibilidade e escalabilidade industrial (Kaba *et al.*, 2024).

A microencapsulação surge como uma estratégia promissora para superar os desafios relacionados à estabilidade das betalaínas. Essa técnica consiste na incorporação dos compostos bioativos em matrizes encapsulantes, formando partículas que atuam como barreiras físicas contra agentes degradantes. Estudos recentes demonstram que métodos como *spray drying* e liofilização, associados ao uso de biopolímeros como maltodextrina, goma arábica e alginato, são eficazes na proteção dos pigmentos, promovendo maior estabilidade térmica, retenção de cor e prolongamento da vida de prateleira, além de facilitar sua aplicação em diferentes sistemas alimentares (Ferreira *et al.*, 2023; Mehta *et al.*, 2024).

Dessa forma, considerando a relevância da valorização de resíduos agroindustriais, a necessidade de desenvolvimento de corantes naturais estáveis e o potencial das ferramentas de modelagem matemática na otimização de processos, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e modelar matematicamente os processos de extração e microencapsulação de betalaínas provenientes da casca do figo-da-índia (*Opuntia spp.*), visando à obtenção de um corante natural estável e tecnologicamente viável para aplicação na indústria de alimentos.

MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATÉRIA-PRIMA

Os frutos de figo-da-índia (*Opuntia spp.*) foram adquiridos junto à Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP). A seleção dos espécimes pautou-se por critérios de maturação comercial, priorizando a uniformidade de

coloração e a integridade fitossanitária, com a exclusão de frutos que apresentassem danos mecânicos ou sinais de degradação microbiológica.

Previamente ao processamento, os frutos foram submetidos a lavagem em água corrente para remoção de sujidades grosseiras, seguida de sanitização por imersão em solução de hipoclorito de sódio (100 mg L^{-1}) durante 10 minutos. O excesso de agente sanitizante foi removido mediante enxágue exaustivo com água destilada.

O fracionamento foi realizado manualmente com o auxílio de utensílios de aço inoxidável, procedendo-se à separação das cascas. Estas foram seccionadas em fragmentos de aproximadamente 2 a 3 cm para otimizar a área de contato durante o tratamento térmico.

A secagem foi conduzida em estufa com circulação de ar forçado (Modelo MA035/1152, Marconi, Piracicaba, Brasil) à temperatura controlada de $50 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. O processo estendeu-se por 48 horas, período necessário para a estabilização higroscópica até a obtenção de massa constante.

Após a desidratação, o material foi processado em moinho de facas e classificado granulometricamente em peneira de 20 mesh (abertura de 0,84 mm), garantindo um pó homogêneo com granulometria inferior a 1 mm. Esta padronização é fundamental para assegurar a reprodutibilidade e a eficiência da cinética de transferência de massa nos ensaios subsequentes.

A matéria-prima processada foi acondicionada em recipientes de polietileno de alta densidade, hermeticamente vedados e protegidos da incidência lumínica. As amostras foram mantidas sob refrigeração a $4 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, preservando a integridade dos compostos termolábeis e a estabilidade físico-química até o momento das análises.

2.2 EXTRAÇÃO DAS BETALAÍNAS

A extração das betalaínas foi realizada por meio de técnica assistida por ultrassom, conforme descrito por Mehta *et al.* (2024) e Vázquez-Espinosa *et al.* (2022), com adaptações. Foram avaliados os efeitos de variáveis operacionais, incluindo: concentração de etanol (% v/v); relação sólido:solvente (g mL^{-1}); tempo de extração (min); temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Para cada ensaio experimental, 1,0 g de amostra seca e moída foi transferida para erlenmeyer de 100 mL. Em seguida, adicionou-se solvente hidroalcolico (etanol:água) em diferentes proporções, conforme delineamento experimental. A



razão sólido:solvente foi ajustada entre 1:10 e 1:30 (g mL⁻¹). O pH da solução foi monitorado, permanecendo na faixa levemente ácida (pH 4–6), condição favorável à estabilidade das betalaínas.

As extrações foram conduzidas em banho ultrassônico (40 kHz, 150 W), sob controle de temperatura (25–60 °C) e tempo de extração (10–60 min), de acordo com as condições experimentais estabelecidas, utilizando um delineamento experimental para mapear as interações entre as variáveis operacionais. Foram avaliados os efeitos da concentração de etanol, relação sólido:solvente, tempo e temperatura.

Ao término da extração, os extratos foram: resfriados à temperatura ambiente; filtrados em papel filtro qualitativo; centrifugados a 5000 rpm por 10 min; o sobrenadante coletado foi armazenado em frascos âmbar sob refrigeração (4 °C), evitando degradação por luz e oxigênio (Morales *et al.*, 2021). Todos os ensaios foram realizados em triplicata, assegurando confiabilidade e consistência dos resultados.

2.3 QUANTIFICAÇÃO DAS BETALAÍNAS

O teor de betalaínas foi determinado por espectrofotometria UV-Vis, conforme metodologia descrita por Morales *et al.* (2021). As leituras espectrofotométricas foram realizadas em comprimentos de onda específicos para cada classe de pigmentos: 538 nm para betacianinas e 480 nm para betaxantinas. Para a otimização, utilizou-se um delineamento Box–Behnken associado à Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), permitindo identificar o ponto de máxima eficiência através de um modelo polinomial de segunda ordem.

A concentração dos pigmentos foi calculada com base na lei de Beer-Lambert, utilizando a seguinte equação:

$$C = \frac{A \times DF \times MW \times 1000}{\epsilon \times l} \quad (1)$$

Onde:

C = concentração (mg L⁻¹);

A = absorvância;

DF = fator de diluição;

MW = massa molar;

ϵ = coeficiente de extinção molar;

l = caminho óptico da cubeta (cm).

Para o cálculo, foram adotados os valores de massa molar (MW) de 550 g/mol e coeficiente de extinção molar (ϵ) de 60.000 L/(mol × cm) para betacianinas, e 339 g/mol e 48.000 L/(mol × cm) para

betaxantinas, respectivamente. O caminho óptico (l) utilizado foi de 1 cm.

Os resultados foram expressos em mg de betalaínas por grama de matéria seca, permitindo a comparação entre amostras e assegurando a confiabilidade dos dados obtidos. Essa abordagem metodológica possibilita a caracterização precisa dos pigmentos, fornecendo subsídios para análises de estabilidade, atividade biológica e aplicações tecnológicas.

2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA DA EXTRAÇÃO

Para otimização do processo de extração, foi utilizado um delineamento experimental do tipo Box–Behnken, associado à Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), conforme descrito por Kaba *et al.* (2024).

O planejamento experimental foi estruturado com base em três fatores independentes, avaliados em três níveis codificados (-1, 0, +1), totalizando 15 unidades experimentais. Este conjunto compreendeu 12 pontos fatoriais e três repetições no ponto central, estratégia essencial para a estimativa do erro puro e a avaliação da adequação do modelo.

As variáveis selecionadas e seus respectivos domínios foram:

X_1 : concentração de solvente (%);

X_2 : tempo de extração (min);

X_3 : temperatura (°C).

A variável resposta foi o rendimento de betalaínas (mg g⁻¹). Os dados experimentais foram ajustados a um modelo polinomial de segunda ordem:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2)$$

Onde Y representa a resposta predita; β_0 é o intercepto (coeficiente constante); β_i , β_{ii} e β_{ij} representam os coeficientes de regressão linear, quadrático e de interação, respectivamente; e ϵ corresponde ao erro experimental.

A significância dos coeficientes foi avaliada por análise de variância (ANOVA), considerando nível de significância de 5% ($p < 0,05$). A validação do modelo foi realizada por comparação entre valores experimentais e preditos.

2.5 MICROENCAPSULAÇÃO DAS BETALAÍNAS

O extrato otimizado foi submetido ao processo de microencapsulação utilizando a técnica de spray drying, conforme Ferreira *et al.* (2023). Foram

utilizados como agentes encapsulantes: maltodextrina e goma arábica.

As soluções encapsulantes foram preparadas com teor de sólidos entre 10 e 20% (m/v), sendo posteriormente misturadas ao extrato. A mistura foi homogeneizada e submetida ao spray dryer sob condições controladas de temperatura de entrada (140–160 °C) e saída (70–90 °C) e com vazão de alimentação: ajustada conforme equipamento.

A amostra (pó) obtida foi coletada, acondicionada em embalagens opacas e armazenada em dessecador. A vazão de alimentação foi mantida constante em 0,5 (L/h⁻¹), utilizando um bico atomizador de diâmetro 0,7, visando a uniformidade na formação das micropartículas.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DAS MICROPARTÍCULAS

As micropartículas foram avaliadas quanto aos seguintes parâmetros:

- Eficiência de encapsulação (%): razão entre o conteúdo de betalaínas encapsuladas e o total inicial;
- Umidade (%): determinada por secagem em estufa;
- Cor (L^* , a^* , b^*): utilizando colorímetro;
- Estabilidade térmica e oxidativa: monitorada ao longo do armazenamento sob diferentes condições de temperatura e luminosidade;
- Morfologia: analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- A caracterização das micropartículas seguiu uma abordagem analítica multidimensional, integrando a investigação de variáveis termodinâmicas, propriedades ópticas e atributos morfológicos, a fim de validar a integridade estrutural e a estabilidade dos pigmentos encapsulados.

2.6.1 Eficiência de Encapsulação (EE%) e Estabilidade

A Eficiência de Encapsulação foi determinada pela quantificação da razão entre o teor de betalaínas efetivamente retidas na matriz polimérica e o conteúdo total de pigmentos inicialmente submetido ao processo de atomização.

A estabilidade dos sistemas desenvolvidos foi monitorada prospectivamente, avaliando-se a cinética de degradação térmica e oxidativa sob condições controladas de iluminância e temperatura, visando mimetizar o comportamento do ingrediente durante o armazenamento comercial.

2.6.2 Umidade e Atividade de Água

O teor de umidade foi determinado por gravimetria em estufa com circulação de ar forçado a 105 °C até a obtenção de massa constante, seguindo os protocolos oficiais da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC).

O teor de umidade foi calculado gravimetricamente pela seguinte equação:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$U(\%)$ = teor de umidade (%);

m_i = massa inicial da amostra (g);

m_f = massa final após secagem (g).

Paralelamente, a atividade de água (a_w) foi quantificada por meio de um higrômetro digital de ponto de orvalho (Modelo AquaLab 4TE, Decagon Devices, Pullman, WA, USA), operando sob temperatura controlada de 25 °C, seguindo os protocolos oficiais da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC).

A atividade de água foi determinada com base na relação entre a pressão parcial de vapor de água sobre o alimento e a pressão de vapor da água pura:

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

Onde:

a_w = atividade de água (adimensional);

p = pressão parcial de vapor de água sobre a amostra;

p_0 = pressão de vapor da água pura à mesma temperatura.

A análise conjunta desses parâmetros é fundamental para inferir a eficiência do processo de atomização, bem como para avaliar a estabilidade higroscópica e



o potencial de conservação do pó final, visto que valores reduzidos de a_w são determinantes na inibição de reações degradativas e do crescimento microbiano.

2.6.3 Propriedades Ópticas e Colorimetria

A caracterização cromática foi realizada no sistema *CIELab* (L^* , a^* , b^*), utilizando um colorímetro digital (Modelo CR-400, Konica Minolta, Tóquio, Japão), operando com iluminante D65 e observador padrão de 2°. A calibração prévia com placa cerâmica branca garantiu a acurácia das coordenadas de luminosidade (L^*), transição do verde ao vermelho (a^*) e do azul ao amarelo (b^*), permitindo a avaliação precisa da integridade visual do pigmento após o tratamento térmico.

2.6.4 Cinética de Estabilidade Térmica e Oxidativa

A estabilidade dos bioativos foi monitorada prospectivamente durante o armazenamento sob condições controladas de temperatura e iluminância. As amostras foram submetidas a protocolos de envelhecimento acelerado para avaliar a suscetibilidade das betalainas à degradação oxidativa e térmica, permitindo o cálculo de taxas de retenção e a compreensão do comportamento da matriz frente a fatores ambientais adversos.

2.6.5 Caracterização Ultraestrutural e Morfológica

A morfologia e a integridade das microcápsulas foram examinadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As amostras foram previamente fixadas em suportes metálicos (*stubs*) com fita de carbono dupla face e submetidas ao processo de metalização por deposição de ouro (*gold sputtering*).

As micrografias eletrônicas permitiram a análise da topografia superficial, presença de porosidades, fissuras ou enrugamentos, fornecendo dados essenciais sobre a barreira física imposta pelos biopolímeros contra agentes externos.

2.7 MODELAGEM DA ESTABILIDADE DAS BETALAÍNAS

A degradação das betalainas foi modelada por cinética de primeira ordem, permitindo o cálculo preciso do tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) e a comparação da robustez entre o extrato livre e o sistema microencapsulado. O modelo cinético adotado segue a equação:

$$\ln \left(\frac{C}{C_0} \right) = -kt \quad (5)$$

Onde:

C_0 = concentração inicial;

C = concentração ao tempo t ;

k = constante de degradação (tempo^{-1}).

A partir dessa relação, o tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) foi calculado pela expressão:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (6)$$

Onde:

$t_{1/2}$ = tempo de meia-vida (h ou min, conforme unidade de k);

k = constante de velocidade da reação.

Esse tratamento matemático permitiu avaliar quantitativamente a estabilidade das betalainas e comparar a resistência do pigmento no extrato livre em relação ao sistema microencapsulado.

2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão. As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica® 6.0.

A avaliação da influência das diferentes formulações e das condições de extração sobre as variáveis respostas foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA). Previamente à execução dos testes de comparação, os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos de variância constante e normalidade dos resíduos.

Nos casos em que o modelo apresentou significância estatística, as diferenças entre as médias foram discriminadas pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de confiança de 95% ($p < 0,05$). Para o planejamento experimental (MSR), a qualidade do ajuste do modelo polinomial foi verificada pelos coeficientes de determinação (R^2 e R^2_{adj}) e pela análise de falta de ajuste (*lack-of-fit*).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RENDIMENTO DE EXTRAÇÃO DE BETALAÍNAS

Os dados de rendimento de extração de betalainas, apresentados na Tabela 1, variaram entre 18,4 e 42,7 mg g^{-1} (base seca), dependendo das condições operacionais aplicadas. Os maiores valores foram obtidos sob condições intermediárias de etanol (60% v/v), temperatura de 45 °C e tempo de extração de 40 minutos. Este comportamento corrobora os achados de Castellar *et al.* (2003), que atribuem a maior eficiência de sistemas hidroalcoólicos moderados ao equilíbrio ótimo entre a polaridade do

solvente e a preservação da estabilidade química dos pigmentos.

Tabela 1. Rendimento de extração de betalaínas em função da concentração de etanol.

Etanol (%)	Rendimento (mg g ⁻¹ , base seca)
20	18,4 ^c ± 0,9
40	31,2 ^b ± 1,4
50	38,5 ^{ab} ± 1,7
60	42,7 ^a ± 2,1
70	39,8 ^{ab} ± 1,6
80	34,1 ^b ± 1,3

Aportes científicos atuais ratificam a supremacia de sistemas hidroalcoólicos, em concentrações situadas entre 50% e 70% (v/v), como os meios mais eficientes para a recuperação de betalaínas a partir de matrizes vegetais, notadamente no gênero *Opuntia spp.* O desempenho superior é atribuído à otimização da interface matriz-solvente, que potencializa os coeficientes de transferência de massa e a permeabilidade na estrutura celular, assegurando, em paralelo, a mitigação da degradação oxidativa e a preservação da integridade química dos pigmentos (Sáenz *et al.*, 2018; Castro-Muñoz *et al.*, 2020; Khan *et al.*, 2021).

A predominância de misturas etanólicas em proporções intermediárias fundamenta-se no caráter anfifílico das betalaínas, as quais exibem solubilidade otimizada em sistemas de polaridade balanceada. Sob essa ótica, concentrações excessivas de etanol tendem a reduzir a solubilidade desses analitos e a comprometer a estabilidade estrutural das betacianinas e betaxantinas, devido a alterações desfavoráveis no ambiente dielétrico do meio.

Nesse contexto, a eficiência do processo extrativo é regida por parâmetros físico-químicos fundamentais, como a constante dielétrica do solvente e o coeficiente de partição sólido-líquido, os quais determinam a capacidade de solubilização e a cinética de transferência de massa dos compostos bioativos para a fase líquida (Azmir *et al.*, 2016; Ali *et al.*, 2019).

O ajuste polinomial (Figura 1) revelou um comportamento quadrático significativo, no qual o rendimento apresentou comportamento parabólico, atingindo o ápice em 60% de etanol, seguido de declínio. Esse fenômeno decorre da redução da constante dielétrica do meio em altas concentrações

alcoólicas, o que limita a solubilidade das betalaínas, que possuem caráter anfifílico. A análise de variância (ANOVA) confirmou que a interação entre temperatura e concentração de solvente foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Esse tipo de comportamento é amplamente reportado em estudos que utilizam a metodologia de superfície de resposta (RSM), nos quais termos quadráticos e interações entre variáveis são determinantes para a explicação da variabilidade do rendimento de extração de compostos bioativos (Bezerra *et al.*, 2017; Montgomery, 2019).

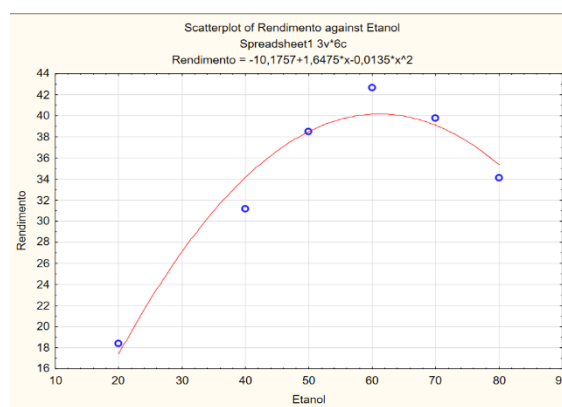


Figura 1. Gráfico de dispersão do rendimento em função da concentração de etanol. A linha vermelha representa o ajuste polinomial de segundo grau (quadrático), indicando o ponto de máxima eficiência do processo.

Estudos recentes aplicados à extração de betalaínas relatam elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,95$), evidenciando a robustez de modelos de segunda ordem para predição e otimização do processo (García-Cruz *et al.*, 2020; Rodríguez-Amaya, 2021).

A influência da temperatura seguiu uma tendência típica de degradação térmica: incremento do rendimento até um ponto ótimo, seguido de redução em temperaturas mais elevadas. Esse comportamento está associado à natureza termossensível das betalaínas, que sofrem degradação por hidrólise e oxidação (Herbach *et al.*, 2006; Azeredo, 2009).

Temperaturas superiores a 50 °C promovem a degradação estrutural das betacianinas, resultando na perda de coloração e redução da atividade antioxidante, devido à ruptura do sistema conjugado das moléculas (Esquivel, 2016; Tesoriere *et al.*, 2020).

Além disso, o tempo de extração também apresentou efeito quadrático significativo ($p < 0,05$), indicando

que períodos prolongados favorecem a degradação dos compostos, em detrimento da eficiência do processo (Gengatharan *et al.*, 2015).

As condições ótimas previstas foram: etanol 58%, temperatura de 47 °C e tempo de 38 min. Nessas condições, o valor experimental (41,9 mg g⁻¹) apresentou erro relativo inferior a 4% em relação ao modelo, validando a elevada capacidade preditiva da modelagem matemática empregada. Esse baixo erro relativo está em consonância com a literatura recente, na qual desvios inferiores a 5% são considerados indicativos de excelente ajuste e confiabilidade do modelo para fins de otimização e escalonamento industrial (Bezerra *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos evidenciam que a modelagem matemática constitui uma ferramenta robusta para a otimização da extração de betalaínas de figo-da-índia, permitindo maximizar o rendimento enquanto minimiza a degradação térmica e química dos pigmentos. A obtenção de extratos sob condições ótimas representa uma etapa fundamental para processos subsequentes, como a microencapsulação, uma vez que influencia diretamente a eficiência de encapsulação, a estabilidade dos pigmentos e sua aplicação como corantes naturais em sistemas alimentícios (Castro-Muñoz *et al.*, 2021).

3.2 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

O modelo de segunda ordem ajustado apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,93$, indicando boa capacidade de explicação da variabilidade dos dados experimentais. A análise de variância (ANOVA) revelou que os termos lineares de temperatura e concentração de solvente, bem como a interação entre essas variáveis, foram estatisticamente significativos ($p < 0,05$).

As condições ótimas previstas pelo modelo foram (Tabela 2): concentração de etanol de 58%, temperatura de 47 °C e tempo de 38 min. A interação significativa entre a temperatura (47 °C) e a concentração de etanol (58%) sugere que o aumento da temperatura favoreceu a solubilidade dos pigmentos e reduziu a viscosidade do meio, enquanto a concentração moderada de solvente garantiu a polaridade ideal para a estabilidade das betalaínas durante a transferência de massa.

Tabela 2. Rendimento de extração de betalaínas em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Rendimento (mg g ⁻¹ , base seca)
25	22,5 ^c ± 1,1

35	34,8 ^b ± 1,5
45	42,7 ^a ± 2,0
55	38,2 ^{ab} ± 1,8
65	30,4 ^{bc} ± 1,2

A representação gráfica da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é apresentada na Figura 2, permitindo visualizar a interação entre as variáveis independentes e o rendimento da extração.

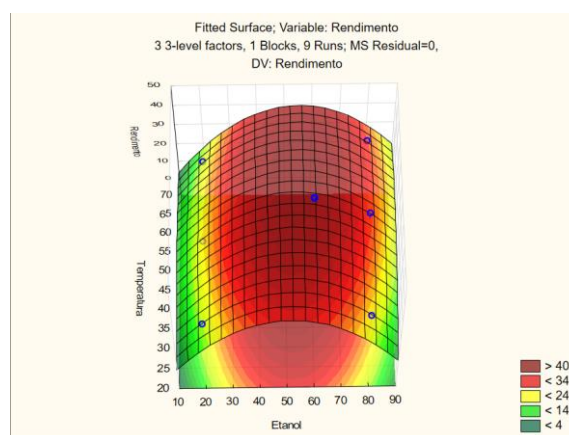


Figura 2. Superfície de resposta para o rendimento de extração de betalaínas (mg g⁻¹) em função da concentração de etanol (%) e da temperatura (°C).

Observa-se que as regiões de maior eficiência (áreas em vermelho escuro, > 40 mg g⁻¹) concentram-se em temperaturas próximas a 45–50 °C e concentrações de etanol entre 50% e 70%, validando o modelo matemático e confirmando as condições ótimas previstas de 58% de etanol e 47 °C. Os pontos azuis correspondem aos ensaios experimentais, enquanto a superfície colorida traduz o modelo predito, corroborando a boa capacidade de explicação da variabilidade dos dados ($R^2 = 0,93$). Nessas condições, o rendimento predito foi de 43,5 mg g⁻¹, enquanto o valor experimental obtido foi de 41,9 mg g⁻¹, resultando em erro relativo inferior a 4%.

Esses resultados estão em consonância com os achados de Cai *et al.* (2005), que demonstraram a eficiência da MSR na otimização da extração de pigmentos naturais, destacando a relevância da interação entre solvente e temperatura. De forma semelhante, Stintzing e Carle (2007) reforçaram que concentrações moderadas de solvente favorecem a estabilidade das betalaínas, evitando degradação térmica e assegurando maior rendimento, também confirmaram que a MSR é uma ferramenta robusta para compreender a complexidade da extração de compostos bioativos, permitindo ajustes finos nas condições experimentais.

Assim, a proximidade entre valores preditos e observados neste estudo, aliada à concordância com a literatura, evidencia a confiabilidade do modelo proposto e reforça a aplicabilidade da MSR como estratégia de otimização na extração de betalaínas.

3.3 EFICIÊNCIA DE MICROENCAPSULAÇÃO

A microencapsulação demonstrou ser uma barreira física eficaz, reduzindo a constante de degradação (k) e aumentando o tempo de meia-vida de no máximo 33 dias (extrato livre) para até 87 dias (encapsulado). Esses resultados evidenciam o efeito da matriz encapsulante como barreira contra oxigênio, luz e temperatura. A formação de uma estrutura vítrea amorfa limita a mobilidade molecular, retardando reações degradativas. A microencapsulação é reconhecida como uma das estratégias mais eficazes para estabilizar pigmentos naturais. (Azeredo, 2009)

A eficiência de encapsulação variou entre 76,2% e 89,5%, com melhores resultados na formulação contendo 15% de maltodextrina e 5% de goma arábica. Esses valores indicam adequada retenção do composto ativo durante o processo de secagem. A maltodextrina contribui para a formação de matriz estável, enquanto a goma arábica melhora a emulsificação. A combinação favorece a formação de partículas mais uniformes e protegidas. Esses resultados são compatíveis com os relatados por Tonon *et al.* (2008), que observaram eficiências entre 70% e 90% para compostos bioativos encapsulados por *spray drying*.

A maior eficiência observada pode ser atribuída à formação de uma matriz mais densa e menos permeável ao oxigênio, reduzindo perdas durante a secagem.. Essa estrutura reduz a difusão de gases e umidade, fatores críticos para a degradação das betalaínas. Além disso, a goma arábica contribui para a formação de uma película superficial mais resistente. Isso resulta em menor exposição do núcleo bioativo ao ambiente externo. A interação entre os biopolímeros promove maior estabilidade estrutural. (Zamora *et al.*, 2010).

Na Tabela 3, observa-se aumento do rendimento de extração de 20,1 para 42,7 mg g⁻¹ entre 10 e 40 minutos. Esse comportamento indica maior difusão dos compostos com o aumento do tempo. Após 40 minutos, há redução para 37,9 mg g⁻¹ aos 60 minutos. Isso sugere possível degradação das betalaínas ou saturação do solvente. O excesso de tempo pode comprometer compostos sensíveis. Assim, o tempo ótimo de extração é um fator crítico. (Silva *et al.*, 2015)

Tabela 3. Rendimento de extração de betalaínas em função do tempo de extração.

Tempo (min)	Rendimento (mg g ⁻¹ , base seca)
10	20,1 ^c ± 0,8
20	33,6 ^b ± 1,4
30	40,8 ^{ab} ± 1,9
40	42,7 ^a ± 2,1
60	37,9 ^b ± 1,7

Os resultados confirmam a eficiência da microencapsulação associada à otimização da extração. A integração dessas etapas garante maior estabilidade e viabilidade tecnológica do produto. O controle dos parâmetros de processo é essencial para maximizar desempenho. A escolha adequada dos encapsulantes influencia diretamente os resultados obtidos. Esses fatores são determinantes para aplicação industrial. (Desai; Park, 2005)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MICROPARTÍCULAS

As micropartículas apresentaram teores de umidade entre 2,8–4,6% e atividade de água (a_w) entre 0,21–0,34, valores que corroboram a eficácia do processo de secagem e garantem a estabilidade microbiológica do produto. No que concerne aos parâmetros cromáticos, observou-se uma luminosidade (L^*) entre 42,5–55,8, a^* (intensidade de vermelho) entre 18,5–26,3 e b^* (intensidade de amarelo/azul) entre -2,1–4,8. Esses indicadores evidenciam a preservação da cromaticidade característica das betalaínas após o estresse térmico, situando-se dentro dos padrões físico-químicos desejáveis para pós alimentícios atomizados (Tonon *et al.*, 2008).

Os resultados de eficiência de microencapsulação das betalaínas variaram significativamente em função da composição da matriz polimérica (Tabela 4).

Tabela 4. Eficiência de microencapsulação das betalaínas em diferentes formulações.

Formulação	Eficiência (%)
Maltodextrina (MS) 10%	76,2 ^c ± 2,4
Maltodextrina (MD) 15%	82,5 ^b ± 2,0
MD + GA (15% + 5%)	89,5 ^a ± 2,2

Goma arábica (GA) 10% $80,1^{bc} \pm 1,9$

Observou-se que a utilização isolada de maltodextrina a 10% resultou na menor retenção de pigmentos (76,2%), o que pode ser atribuído à baixa viscosidade da solução de alimentação. Conforme discutido por Anselmo *et al.* (2017), concentrações reduzidas de sólidos retardam a formação da crosta protetora na periferia da gota, facilitando a difusão do núcleo bioativo para a superfície e sua consequente degradação térmica. Em contrapartida, a elevação da concentração de maltodextrina para 15% proporcionou um incremento na EE% para 82,5%, demonstrando que o aumento da densidade da matriz é fundamental para a oclusão eficaz do soluto.

A performance da goma arábica a 10% (80,1%) mostrou-se estatisticamente superior à maltodextrina na mesma concentração, fato justificado por suas excelentes propriedades anfifílicas e capacidade de formação de filme, características inerentes à sua fração proteica (Janiszewska, 2014). Todavia, o resultado mais expressivo foi obtido pela blenda composta por maltodextrina e goma arábica (15% + 5%), que alcançou uma eficiência de 89,5%.

Este comportamento evidencia um sinergismo estrutural: enquanto a maltodextrina contribui com o elevado teor de sólidos e proteção oxidativa, a goma arábica confere maior elasticidade e selamento dos poros da matriz. De acordo com Cano-Higueta *et al.* (2015), essa interação polimérica minimiza a higroscopicidade e maximiza a retenção de compostos termolábeis, como as betalaínas da casca do figo-da-índia.

A análise morfológica revelou partículas predominantemente esféricas, com leve enrugamento superficial, conforme ilustrado na Imagem 3. O leve enrugamento superficial observado nas partículas é atribuído à rápida evaporação do solvente durante o processo de atomização e ao subsequente resfriamento da crosta formada pelos polímeros encapsulantes, notadamente maltodextrina e goma arábica, durante o *spray drying*.

Essa característica é recorrente em sistemas nos quais a matriz encapsulante apresenta elevada eficiência na retenção do núcleo bioativo, resultando em partículas mais densas e menos permeáveis ao oxigênio.

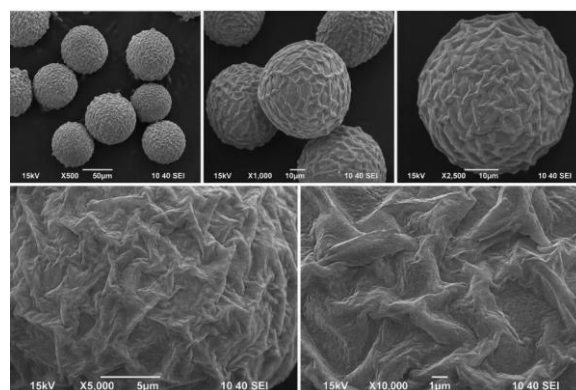


Imagem 3. Morfologia das micropartículas de betalaínas obtidas por *spray drying*, evidenciando formato esférico e leve enrugamento superficial.

Segundo Gharsallaoui *et al.* (2007), essa morfologia desempenha papel crucial na estabilidade físico-química dos pós alimentícios, contribuindo para menor higroscopicidade e maior resistência frente a fatores ambientais adversos. Portanto, a Imagem 3 confirma experimentalmente a descrição teórica, evidenciando que o *spray drying*, aliado ao uso de biopolímeros adequados, é capaz de gerar partículas com propriedades estruturais favoráveis à preservação das betalaínas encapsuladas.

Esse resultado reforça a robustez da técnica aplicada e demonstra a correspondência entre os dados morfológicos obtidos e a literatura especializada, validando a estratégia de microencapsulação como ferramenta eficaz para a estabilização de pigmentos naturais.

3.5 ESTABILIDADE DAS BETALAÍNAS

A degradação das betalaínas seguiu cinética de primeira ordem, com constantes de degradação (k) variando entre $0,021 - 0,035 \text{ dia}^{-1}$ para o extrato livre e $0,008 - 0,015 \text{ dia}^{-1}$ para o encapsulado. Esse comportamento indica que a taxa de degradação é proporcional à concentração do composto remanescente, característica típica de pigmentos naturais sensíveis. A redução significativa dos valores de k após a encapsulação demonstra o efeito protetor da matriz polimérica. Esse tipo de estabilização é amplamente reportado para compostos bioativos sujeitos à oxidação e degradação térmica. (Azeredo, 2009)

O tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) aumentou significativamente após a encapsulação: de 19 – 33 dias no extrato livre para 46 – 87 dias no encapsulado. Esses dados quantificam o efeito protetor da microencapsulação contra a fotoxidação e o estresse higroscópico. Esse comportamento é essencial para viabilizar aplicações industriais.

Resultados semelhantes têm sido observados para pigmentos naturais encapsulados por secagem por atomização. (Gengatharan *et al.*, 2015).

Na Tabela 5, observa-se redução progressiva do teor de betalaínas ao longo do tempo para ambas as amostras, sendo mais acentuada no extrato livre. Após 40 dias, o extrato livre apresentou apenas 37% de retenção, enquanto o encapsulado manteve 69%. Esses dados evidenciam a maior estabilidade conferida pela encapsulação. A diferença entre os sistemas torna-se mais pronunciada com o tempo de armazenamento. Isso indica que a matriz encapsulante atua de forma contínua na proteção do composto (Tonon *et al.*, 2008).

Tabela 5. Estabilidade das betalaínas: comparação entre extrato livre e encapsulado.

Dias	Extrato livre (% restante)	Encapsulado (% restante)
0	100 ^a ± 0	100 ^a ± 0
10	78 ^b ± 2	92 ^{ab} ± 2
20	61 ^c ± 3	84 ^b ± 2
30	48 ^d ± 2	76 ^c ± 3
40	37 ^e ± 2	69 ^d ± 2

A maior retenção observada no sistema encapsulado pode ser atribuída à barreira física formada pelos agentes encapsulantes, que reduz a difusão de oxigênio e a absorção de umidade. Esses fatores são determinantes na degradação das betalaínas, especialmente sob condições ambientais adversas. Além disso, a matriz polimérica contribui para minimizar a exposição à luz, outro fator crítico. A proteção simultânea contra múltiplos agentes degradantes explica o aumento da estabilidade (Desai; Park, 2005).

Esses resultados confirmam a eficácia da microencapsulação na proteção contra fatores ambientais, como luz, oxigênio e temperatura. Resultados semelhantes foram descritos por Azeredo (2009) e Gengatharan *et al.* (2015), que relataram comportamento semelhante, com aumento significativo da estabilidade de pigmentos naturais após encapsulação, especialmente em sistemas submetidos à secagem por atomização. Indicam que compostos bioativos encapsulados apresentam menor perda durante o armazenamento quando comparados aos sistemas não encapsulados, mantendo maior retenção de cor e atividade funcional ao longo do tempo.

Além disso, há evidências de que a encapsulação pode aumentar a retenção de betalaínas após o processamento, reduzindo perdas associadas à oxidação e à exposição térmica (Dicastillo *et al.*, 2023).

3.6 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA E IMPLICAÇÕES

Os valores de rendimento, eficiência de encapsulação e estabilidade obtidos neste estudo estão dentro das faixas reportadas na literatura, indicando que o processo desenvolvido é tecnicamente viável e reproduzível. Além disso, o uso da casca do figo-da-índia como matéria-prima reforça o potencial de valorização de resíduos agroindustriais, conforme discutido por Stintzing e Carle (2007).

Nesse contexto, observa-se que os rendimentos de extração de betalaínas obtidos são compatíveis com aqueles descritos em estudos recentes, os quais reportam valores na faixa de 15 a 50 mg g⁻¹ em base seca para diferentes espécies de *Opuntia* spp., dependendo das condições de extração e da natureza da matriz vegetal. Essa variabilidade é atribuída principalmente a fatores como polaridade do solvente, temperatura, tempo de processamento e características estruturais do material vegetal, o que reforça a adequação das condições otimizadas empregadas neste estudo (Zakaria *et al.*, 2025).

No que se refere à eficiência de encapsulação, os resultados demonstram elevada retenção dos compostos bioativos, indicando que os parâmetros operacionais adotados foram eficazes na proteção das betalaínas. Esse desempenho está diretamente relacionado à interação entre os agentes encapsulantes e a estrutura química dos pigmentos, o que favorece a formação de sistemas mais estáveis e resistentes a fatores externos (Azeredo, 2017).

A estabilidade dos compostos ao longo do armazenamento também se mostrou satisfatória, evidenciando que a combinação entre condições otimizadas de extração e técnicas adequadas de microencapsulação contribui significativamente para a preservação das propriedades físico-químicas e funcionais das betalaínas. A degradação desses pigmentos está associada a fatores como exposição à luz, oxigênio e temperatura, sendo minimizada por meio da encapsulação, que atua como uma barreira protetora contra agentes degradantes (Khan *et al.*, 2021).

Do ponto de vista tecnológico e ambiental, a utilização da casca do figo-da-índia representa uma estratégia altamente relevante, uma vez que



promove o aproveitamento integral da matéria-prima e reduz a geração de resíduos agroindustriais. Essa abordagem está alinhada com os princípios da economia circular e da bioeconomia, contribuindo para a conversão de subprodutos em ingredientes de alto valor agregado, com potencial aplicação nas indústrias de alimentos, farmacêutica e cosmética (Castro-Muñoz *et al.*, 2020).

De forma integrada, os resultados obtidos não apenas validam a eficiência do processo proposto, mas também evidenciam seu potencial de aplicação em escala industrial. A associação entre modelagem matemática, otimização de processos e microencapsulação configura-se como uma estratégia robusta para a produção de corantes naturais estáveis e funcionais, atendendo à crescente demanda por ingredientes mais seguros, sustentáveis e de origem natural (Liu *et al.*, 2025).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram elevada eficiência de extração (até 42,7 mg g⁻¹), alta eficiência de encapsulação (até 89,5%) e aumento significativo da estabilidade (até 87 dias de meia-vida), evidenciando a viabilidade técnica do corante em pó, evidenciando o potencial da microencapsulação como estratégia para preservação de compostos bioativos.

Além disso, a integração entre modelagem matemática e microencapsulação demonstrou ser uma estratégia robusta para o desenvolvimento de ingredientes naturais estáveis, com potencial de aplicação em escala industrial.

Apesar dos resultados promissores, estudos futuros de aplicação em sistemas alimentares, como sistemas lácteos ou bebidas, são fundamentais para validar o desempenho sensorial e a estabilidade comercial deste novo ingrediente *clean label*, assegurando sua aplicabilidade industrial e aceitação pelo consumidor.

REFERÊNCIAS

ALI, A. *et al.* Application of response surface methodology in extraction of bioactive compounds: a review. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], 2019.

AZEREDO, H. M. C. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 44, n. 12, p. 2365–2376, 2009.

AZMIR, J. *et al.* Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review.

Journal of Food Engineering, [s. l.], v. 117, p. 426–436, 2016.

BEZERRA, M. A. *et al.* Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, [s. l.], v. 76, p. 965–977, 2017.

CAI, Y. *et al.* Characterization and application of betalain pigments from plants of the Amaranthaceae. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 370–376, 2005.

CASTELLAR, R. *et al.* Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 2772–2776, 2003.

CASTRO-MUÑOZ, R. *et al.* Emerging technologies for the extraction of bioactive compounds from plant materials. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], 2020.

CASTRO-MUÑOZ, R. *et al.* Stability and application of betalains in food systems: recent advances. **Food Chemistry**, [s. l.], 2021.

CHEOK, A. *et al.* The effects of betalain-rich cacti on vascular function: a systematic review. **Food and Function**, [s. l.], v. 11, n. 8, 2020.

CUEVAS-VALENZUELA, J. *et al.* Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds: kinetics and modeling. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 40, p. 111–119, 2018.

DESAI, K. G. H.; PARK, H. J. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. **Drying Technology**, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 1361–1394, 2005.

DICASTILLO, C. *et al.* Developing Core/Shell Capsules Based on Hydroxypropyl Methylcellulose and Gelatin through Electrodynamical Atomization for Betalain Encapsulation. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 2, p. 361, jan. 2023.

ESQUIVEL, P. Betalains: carotenoids and colorants in food. **Food Chemistry**, 2016.

FAO. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2018.

FERREIRA, R. M. *et al.* Production of betalain-rich *Opuntia ficus-indica* peel flour microparticles using



spray-dryer: a holistic approach. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 186, 2023.

GARCÍA-CRUZ, L. *et al.* Optimization of betalain extraction from *Opuntia* spp. using response surface methodology. **Food Bioscience**, 2020.

GENGATHARAN, A. *et al.* Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 645–649, 2015.

GHARSALLAOUI, A. *et al.* Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. **Food Research International**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1107–1121, 2007.

HERBACH, K. M. *et al.* Betalain stability and degradation – structural and chromatic aspects. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 71, n. 4, p. R41–R50, 2006.

JANISZEWSKA, E. Microencapsulation of anthocyanins by spray drying: a review. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 127–142, 2014.

KABA, B. *et al.* Enhancing extraction of betalains from beetroot (*Beta vulgaris* L.) using deep eutectic solvents: optimization, bioaccessibility and stability. **Food Production, Processing and Nutrition**, [s. l.], v. 6, 2024.

KHAN, M. I. *et al.* Stability and bioavailability of betalains: a review. **Food Research International**, [s. l.], v. 143, 2021.

LIU, X. *et al.* Extraction, purification and applications of *Opuntia ficus-indica* compounds: a review. **Frontiers in Pharmacology**, [s. l.], 2025.

MARTINEZ, R. M. *et al.* Betalains: a narrative review on pharmacological mechanisms supporting the nutraceutical potential. **Foods**, [s. l.], v. 13, n. 23, 2024.

MEHTA, D. *et al.* Ultrasound-assisted extraction and encapsulation of betalain from prickly pear: process optimization, in vitro digestive stability, and development of functional gummies. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 108, 2024.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 10. ed. New York: Wiley, 2019.

MORALES, N. X. C. *et al.* Stabilisation of betalains from *Opuntia ficus-indica* by spray and freeze-

drying. **Food Science and Technology International**, [s. l.], v. 27, n. 5, 2021.

OKTAY, B. A. *et al.* A comparative study on the extraction of betalain-rich phenolic compounds in cactus pear. **Orclever Proceedings of Research and Development**, [s. l.], v. 3, n. 1, 2023.

RODRÍGUEZ-AMAYA, D. B. Natural food pigments and colorants: recent advances. **Food Research International**, [s. l.], 2021.

SÁENZ, C. *et al.* Extraction and stability of betalains from cactus pear (*Opuntia* spp.). **Journal of Professional Association for Cactus Development**, [s. l.], 2018.

SILVA, F. A. S. *et al.* Kinetics of bioactive compound extraction from plant matrices. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 234–241, 2015.

SMERIGLIO, A. *et al.* Prickly pear betalain-rich extracts as a promising strategy for intestinal inflammation. **Frontiers in Pharmacology**, [s. l.], v. 12, 2021.

SMIRANI, N. *et al.* Effect of environmentally friendly betalain extraction methods on antioxidant compounds of *Opuntia stricta* fruit. **Foods**, [s. l.], v. 14, n. 5, 2025.

STINTZING, F. C.; CARLE, R. Betalains – emerging prospects for food scientists. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], v. 18, n. 10, p. 514–525, 2007.

TONON, R. V. *et al.* Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 88, n. 3, p. 411–418, 2008.

VÁZQUEZ-ESPINOSA, M. *et al.* Ultrasound-assisted extraction of betalains from *Opuntia dillenii*: optimization using Box–Behnken design. **Agronomy**, [s. l.], v. 12, n. 11, 2022.

ZAKARIA, N. N. A. *et al.* Betalain extraction techniques, principles, optimal conditions and yield: a review. **Tropical Journal of Natural Product Research**, [s. l.], 2025.

ZAMORA, M. C. *et al.* Microencapsulation: principles and applications in food systems. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 47, n. 4, p. 321–330, 2010.