

SUBSTITUIÇÃO DA ERITROSINA POR CORANTES NATURAIS EM CEREJAS ENDULÇADAS COM POLIÓIS PREBIÓTICOS: UMA ABORDAGEM NUMÉRICO-ANALÍTICA PARA SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS E SEGURAS

SOLVING ERYTHROSINE HEALTH CONCERNS THROUGH NATURAL DYE AND POLYOL PREBIOTIC SWEETENING IN CHERRIES: AN ADVANCED NUMERICAL-ANALYTICAL APPROACH

DOI: 10.65747/conali2025v3c19

Juan Ignacio González Pacheco^{1,3,4}; Mariela Beatriz Maldonado²; Heleno Bispo da Silva Júnior³; Rennan Pereira de Gusmão⁴

¹ Bolsista de doutorado e docente/pesquisador do Laboratório de Tratamento de Alimentos e Efluentes - LATE. Departamento de Engenharia Química, Faculdade Regional de Mendoza, Universidade Tecnológica Nacional - UTN FRM; E-mail: jgonzalez534@gmail.com

² Pesquisadora do Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Técnica, Centro Científico Tecnológico de Mendoza, Argentina - CCT CONICET

³ Docente/pesquisador do Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

⁴ Docente/pesquisador do Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Resumo: O presente estudo investiga a difusão de corantes sintético (eritrosina) e natural (gardenia vermelha) em cerejas do tipo Bing, utilizando uma abordagem numérico-analítica para analisar seu comportamento durante o processo de coloração e adoçamento com soluções hiperosmóticas de sacarose e xilitol. Amostras foram submetidas a diferentes concentrações de corantes (119, 238 e 357 ppm) e temperaturas (40, 50 e 60°C), avaliando-se a penetração dos compostos por espectrofotometria, parâmetros de cor CIELAB e cálculo dos coeficientes efetivos de difusão para pele e polpa. Modelos analíticos e numéricos em geometria esférica, com condições de contorno tipo Robin, permitiram visualizar perfis espaço-temporais de concentração e comprovar ajustes estatísticos robustos ($R^2 > 99\%$). Verificou-se que temperatura e concentração atuam sinergicamente, intensificando a difusão, e que o gardenia vermelho apresenta coeficientes significativamente superiores devido à sua menor massa molecular, resultando em coloração mais uniforme e eficiente. A epiderme funcionou como barreira dupla para a transferência de massa, reduzindo os coeficientes de difusão em até duas ordens de magnitude em relação à polpa. Conclui-se que corantes naturais como o gardenia vermelho são alternativas viáveis e eficazes à eritrosina, especialmente sob condições ótimas (357 ppm, 60°C), favorecendo a produção alimentar sustentável e alinhada às demandas de saúde. Parte dos resultados apresentados deriva do artigo publicado na revista Nature's Scientific Reports, intitulado "Diffusion in biological media: a comprehensive numerical-analytical study via surface

analysis and diffusivities calculation", e compõe um avanço da minha tese doutoral "Estudo do fenômeno de difusão de colorantes naturais em cerejas em conserva elaboradas com polialcoóis".

Palavras-chave: corantes naturais; modelagem matemática; produção alimentar natural; transferência de massa; xilitol

Abstract: This study examines the diffusion of synthetic (erythrosine) and natural (red gardenia) dyes in Bing-type cherries via a comprehensive numerical-analytical approach, focusing on their behaviour during sweetening and colouring with hyperosmotic sucrose-xylitol solutions. Samples were exposed to varying dye concentrations (119, 238, and 357 ppm) and temperatures (40, 50, 60°C). The process was monitored using spectrophotometry, CIELAB colour measurements, and effective diffusion coefficient calculations for both skin and flesh, which were fitted to analytical and numerical models with a strong statistical performance ($R^2 > 0.99$). Spherical geometric modelling with Robin boundary conditions enabled temporal and spatial visualisation of concentration profiles. Results revealed a synergistic effect of temperature and concentration on increasing diffusion, with red gardenia showing notably higher coefficients due to its lower molecular mass, resulting in more efficient and homogeneous colour distribution. The cherry skin acted as a double barrier, reducing diffusion coefficients by up to two orders of magnitude compared to the flesh. The findings demonstrate that natural dyes, such as those derived from red gardenia, are effective and viable alternatives to erythrosine, especially under optimal conditions (357 ppm, 60°C), supporting sustainable and health-conscious food production. Part of the results herein are derived from the article published in Nature's Scientific Reports titled "Diffusion in biological media: a comprehensive numerical-analytical study via surface analysis and diffusivities calculation", as part of the doctoral thesis "Study of the diffusion phenomenon of natural colourants in preserved cherries prepared with polyalcohols".

Keywords: natural colourants; mathematical modelling; natural food production; mass transfer; xylitol

INTRODUÇÃO

A difusão de substâncias em meios biológicos é um fenômeno fundamental para o avanço científico e tecnológico em áreas como a engenharia de alimentos, a química aplicada e a biotecnologia. No contexto alimentar, o transporte eficiente de corantes e adoçantes em matrizes vegetais não só tem impacto direto na qualidade sensorial e visual dos produtos, mas também influi nas suas propriedades funcionais e no valor nutricional (1–3). A crescente preocupação dos consumidores e da indústria com alimentos saudáveis e sustentáveis motivou a busca por alternativas naturais aos aditivos sintéticos — tanto no caso dos corantes quanto dos açúcares convencionais (4,5).

Ainda que os corantes sintéticos, como a eritrosina, sejam amplamente utilizados por suas propriedades de estabilidade e intensidade cromática, estudos têm associado seu consumo prolongado a riscos à saúde, incluindo efeitos alérgicos (6,7), distúrbios comportamentais e potencial toxicidade (8–12). Dessa forma, existe um interesse crescente em corantes naturais como o gardenia vermelho, que podem substituir com segurança os sintéticos sem comprometer a atratividade dos produtos. Paralelamente, a substituição parcial ou total do açúcar de mesa e do xarope de milho de alta frutose

(HFCS) por polialcoois de efeito prebiótico — especialmente o xilitol — representa uma tendência promissora, pois alia doçura semelhante com baixo valor calórico e benefícios para a saúde intestinal (13–18).

Neste cenário, o presente estudo se dedica à análise detalhada dos mecanismos de difusão de corantes artificial (eritrosina) e natural (gardenia vermelho) em cerejas do tipo Bing, considerando também o papel de soluções adoçantes à base de sacarose e xilitol (19). O objetivo é compreender, de maneira quantitativa, como a temperatura, a concentração de corantes e a formulação adoçante afetam a cinética de penetração e os coeficientes efetivos de difusão desses compostos (20–24), tanto na epiderme quanto na polpa dos frutos.

Para isso, foram empregadas metodologias analíticas fundamentadas na segunda lei de Fick, além de modelagem numérica via elementos finitos, permitindo obter e comparar perfis espaço-temporais de concentração e mapear zonas de barreira difusiva. O estudo inova ao integrar análise de superfície (parâmetros CIELAB e espectrofotometria UV-VIS) com cálculos matemáticos robustos, garantindo alta precisão na determinação dos coeficientes de difusão.

A relevância científica e tecnológica deste trabalho reside na proposição de soluções industriais que respondam às demandas contemporâneas por produtos alimentícios seguros, naturais e funcionais. Ao validar a substituição da eritrosina por um corante natural e o uso de polialcoois prebióticos, o estudo oferece caminhos para inovações na produção de doces cristalizados e derivados, alinhando-se às tendências de sustentabilidade e bem-estar (25–29). Além disso, contribui com ferramentas matemáticas e experimentais que podem ser estendidas ao estudo da difusão de outros compostos bioativos em diferentes matrizes biológicas, ampliando o impacto da investigação para múltiplas áreas do conhecimento.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Materiais

Utilizaram-se cerejas do tipo Bing (*Prunus avium*), adquiridas em Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina, cuidadosamente selecionadas, calibradas (27 mm de diâmetro médio), descaroçadas e desulfitadas. O processo de desulfitação foi realizado por imersão das frutas em banhos de água potável à temperatura ambiente durante 24 horas, com renovação da água a cada 4 horas, para remover resíduos de anidrido sulfuroso utilizado na conservação. Foram empregados dois tipos de corantes, Eritrosina (sintético, Macsen Labs, Índia) e Gardenia vermelho (natural, Omya Inc., EUA). Ambos os corantes foram aplicados nas concentrações de 119, 238 e 357 ppm.

As soluções adoçantes foram preparadas com uma mistura de sacarose (50%) e xilitol (50%) em proporções w/v, com xilitol e outros polióis (lactitol e maltitol) de grau alimentício (30–34). Essas formulações foram replicadas para garantir a reprodutibilidade dos resultados dos testes, confirmando assim que não ocorreu cristalização na formulação selecionada (Tabela 1).

Tabela 1 – Formulações de soluções de sacarose e polialcoois preparadas para cristalizar cerejas

Formulação (form i)	Composição	Concentração (% p/v)
form 1	Sacarose	100
form 2	Lactitol	100
form 3	Maltitol	25
form 4	Maltitol	50
form 5	Maltitol	75
form 6	Maltitol	100
form 7	Xilitol	25
form 8	Xilitol	50
form 9	Xilitol	75
form 10	Xilitol	100
form 11	Maltitol/Xilitol	75/25
form 12	Maltitol/Xilitol	80/20
form 13	Maltitol/Xilitol	90/10
form 14	Maltitol/Xilitol	95/5
form 15	Lactitol/Xilitol	75/25
form 16	Lactitol/Xilitol	80/20
form 17	Lactitol/Xilitol	90/10
form 18	Lactitol/Xilitol	95/5

Fonte: Própria

Outros reagentes: Ácido cítrico e bicarbonato de sódio (ambos a 10% w/v) para ajuste do pH das soluções. Água destilada ou deionizada para preparo das soluções. Equipamentos: Banhos-maria controlados para ajuste de temperatura, agitador magnético com aquecimento (220 rpm), colorímetro Konica Minolta CR-400 (parâmetros CIELAB, iluminante D65) (35–37), espectrofotômetro UV-VIS (Perkin Elmer Lambda 35) para análise das concentrações dos corantes em solução, software *MATLAB® R2017a* para simulações numéricas e GraphPad PRISM para regressões (38–40).

2. Métodos

2.1. Preparação das Soluções Adoçantes

As soluções foram preparadas dissolvendo-se as quantidades adequadas de sacarose e xilitol em água destilada, sob agitação magnética a 60°C e 220 rpm, até obtenção de uma solução homogênea. As concentrações utilizadas aumentaram progressivamente de 25 até 65°Brix, simulando o método tradicional francês ou de impregnação lenta (19,30,41,42).

2.2. Processo de Adoçamento e Coloração

Após desulfitação, as cerejas foram submetidas a adoçamento por múltiplas impregnações em soluções hiperosmóticas, com incrementos diários de concentração (25, 35, 45, 55 e 65°Brix). O processo de coloração foi iniciado quando a solução atingiu 35°Brix, com adição do corante nas concentrações propostas. O sistema permaneceu em repouso por 24 horas antes da próxima impregnação. Refrigerou-se a solução até aproximadamente 50°C antes da adição dos frutos, evitando plasmólise e enrugamento da casca. Todo o processo foi conduzido sob agitação contínua a 220 rpm em banhos-maria a temperaturas controladas de 40, 50 ou 60°C. O pH das soluções foi ajustado e mantido entre 4,2 e 4,8 utilizando-se ácido cítrico ou bicarbonato, conforme necessário, garantindo precipitação adequada do corante no interior da matriz do fruto e maior fixação da cor.

2.3. Amostragem e Análise de Cor

Em cada etapa de impregnação e após o término do processo, amostras de cerejas foram retiradas aleatoriamente de diferentes regiões do recipiente. As frutas foram cortadas em seções e analisadas em pontos equidistantes do centro até a periferia (2,63 mm, 5,26 mm e 10,53 mm aproximadamente). Os parâmetros L^* , a^* , b^* (espaço de cor CIELAB) foram medidos em triplicata utilizando colorímetro, tanto na superfície externa quanto nas seções transversais. Para determinação da concentração dos corantes nas soluções de entrada e saída, amostras dos líquidos foram analisadas por espectrofotometria incorporando triplicatas para aumentar a precisão.

2.4. Determinação da Difusividade

As curvas de entrada (in) e saída (out) dos corantes foram registradas ao longo do tempo, sendo catalogadas para posterior ajuste a modelos matemáticos. A diferença de concentração temporal permitiu calcular os coeficientes efetivos de difusão para pele e polpa das cerejas.

2.4.a. Modelagem Matemática

Utilizou-se a segunda lei de Fick aplicada a esferas ocas para modelar o processo de difusão, ajustando-se os dados experimentais à solução de séries infinitas (até 220 termos), que será explicado mais adiante. Condições de contorno do tipo Robin (dupla fronteira, pele e polpa) foram implementadas.

Considerando a transferência de espécies, foi utilizada a equação do teorema de transporte de Reynolds. Assumindo que a concentração molar total da mistura binária é constante e que os coeficientes de difusão são independentes das coordenadas espaciais, a equação pode ser simplificada e expressa tensorialmente, equação (1), da seguinte forma (43):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\underline{v}^* \cdot \nabla C_i) = D_{ij} \nabla^2 C_i + R_i - \frac{C_i}{C} (R_i + R_j) \quad (1)$$

Uma versão alternativa da equação (1) pode ser obtida ajustando o parâmetro de vermelhidão, a^* , usando o método dos mínimos quadrados com uma abordagem linear, em comparação com a concentração atual de eritrosina ou corante vermelho de gardênia, equação (2), estabelecendo assim uma correlação que permitiu que os dados experimentais fossem ajustados à equação geral que rege o transporte de espécies (44,45).

$$\frac{\partial a^*}{\partial \theta} = \frac{2}{R} \frac{\partial a^*}{\partial R} + \frac{\partial^2 a^*}{\partial R^2} \quad (2)$$

Sujeito às seguintes condições iniciais e de contorno:

$$C.I.: A \theta = 0 \quad a^* = \frac{a_i^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*} = 1 \quad a \quad A \leq R$$

$$\leq 1 \quad (3)$$

$$C.F.1: A \theta > 0 \quad a^* = \frac{a_s^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*} = 0 \quad a \quad R =$$

$$A \quad (4)$$

$$C.F.2: A \theta > 0 \quad \frac{\partial a^*}{\partial R} + \frac{D_S}{D_F} \left(\frac{r_0}{r_s - r_0} \right) a^* = 0 \quad a \quad R$$

$$= 1 \quad (5)$$

Onde

$$\theta = \frac{D_{ij} t}{r_0^2}; R = \frac{r}{r_0}; A = \frac{r_A}{r_0}; a^* = \frac{a(t)^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*}$$

Observe que A é um raio adimensional, dado pela relação entre r_A e r_0 , $a(t)^*$ é a vermelhidão na polpa da cereja com o passar do tempo, a_s^* é a vermelhidão na casca da cereja em contato com a solução adoçante e a_i^* é a vermelhidão na polpa da cereja no início do experimento.

Então, uma série infinita pode ser expressa pela equação (6), representando a evolução do parâmetro volumétrico adimensional $a_{V^*}(\theta)$ em relação ao tempo adimensional Θ , modificada para aquela apresentada por Maldonado e González Pacheco (19,41).

$$a_{V^*}(\theta) = \frac{3}{(1-A^3)} \sum_1^{\infty} \left\{ \frac{1}{b} \left[\int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR \right]^2 - \frac{WA_0}{\lambda_n^2 - A_1} \left[e^{(\lambda_n^2 - A_1)\theta} - 1 \right] \int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR \right\} e^{-\lambda_n^2 \theta} \quad (6)$$

Simulações com método dos elementos finitos foram realizadas no *MATLAB*[®] utilizando malhas radiais e temporais (intervalo mm para raio, min para tempo), permitindo visualizar os perfis espaço-temporais de concentração.

Considerou-se apropriado assumir que a acumulação de solutos na casca, representada por $r_s - r_0$, e, conseqüentemente, a resistência à transferência de espécies, era insignificante em comparação com o fluxo através da superfície porosa e o próprio fluxo, dado pela espessura da casca da cereja de 0,0004 m (Fig. 1.b).

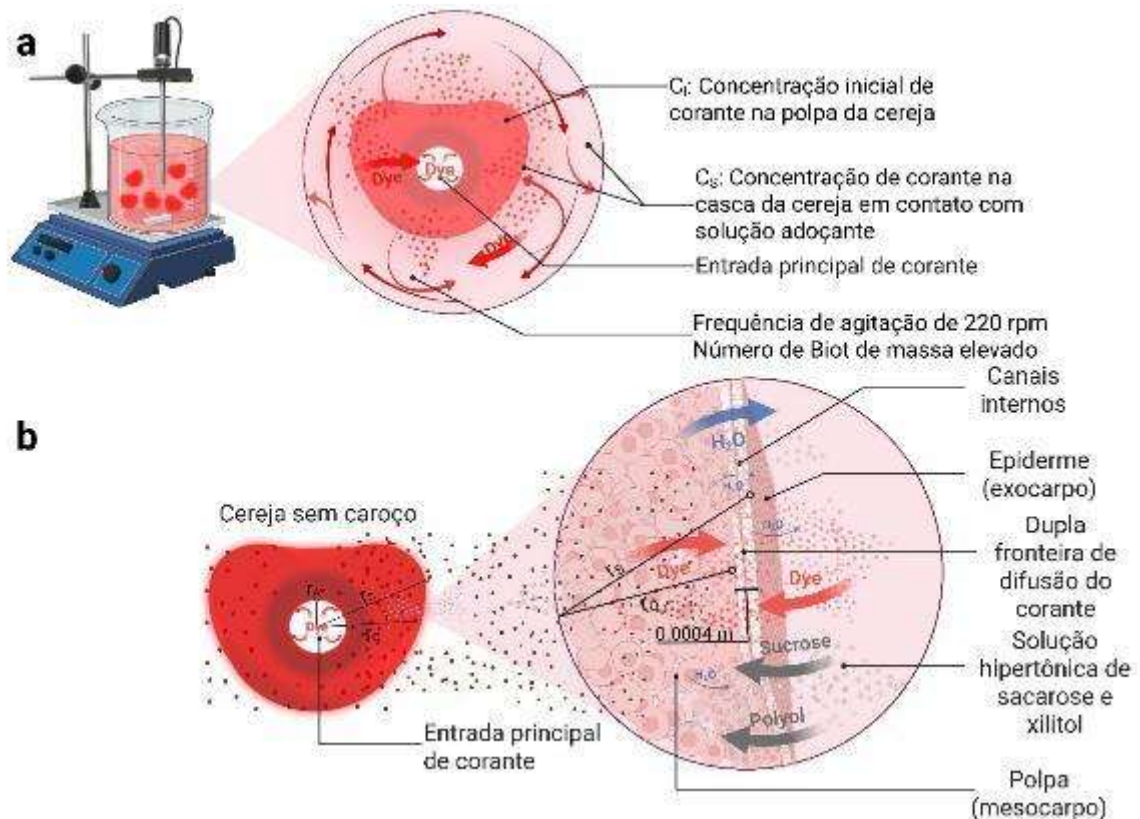


Figura 1 – a. Condições em que foram realizados os experimentos de coloração e impregnação das cerejas, às quais foram ajustadas as condições de fronteira. b. Representação esquemática dos raios internos da cereja e ampliação da zona da epiderme e sua área circundante, na qual se observa a formação de um limite de dupla difusão. A visualização ilustra um modelo simples do fluxo do corante através da polpa e da casca da cereja.

Fonte: Created in BioRender. González Pacheco, J. (2025)

A polpa das cerejas foi considerada homogênea e isotrópica, e o processo de difusão apresentou simetria radial com difusão unidirecional. Devido à grande agitação da solução adoçante em torno das superfícies interna e externa, a concentração nessas áreas adquire imediatamente a concentração do líquido (Fig. 1.a). Além disso, a espessura da epiderme era muito menor do que os raios das faces interna e externa. Assim, a diferença nas áreas de superfície pôde ser desconsiderada, e a espessura assumida como $r_s - r_o$ (Fig. 1.b). Deve-se observar que, apesar de criar 18 formulações distintas de adoçantes, as cerejas são imersas exclusivamente na solução hipertônica de sacarose-xilitol para o processo de cristalização.

Para determinar os coeficientes de difusão efetivos e os autovalores λ_n , foi empregado um método de regressão não linear iterativo utilizando o método dos mínimos quadrados em conjunto com o software *GraphPad PRISM* © (V9.5.1, MA, EUA). Para um número de Biot de transferência de massa grande (nas condições mencionadas anteriormente) correspondente à condição de contorno especificada, equação (5), podem surgir erros de truncamento consideráveis, particularmente durante as etapas iniciais do processo. A regressão não linear baseada em um número limitado de termos na série de soluções analíticas para determinar a difusividade efetiva é considerada inadequada para obter resultados precisos. Consequentemente, os primeiros 220 termos da solução analítica da equação de difusão para geometria esférica foram incorporados (46,47).

2.5. Análise Estatística

Aplicaram-se métodos estatísticos como a análise de variância (ANOVA), testes de Tukey-Kramer e Scheffé, além de ajuste por mínimos quadrados e método do qui-quadrado. O nível de significância considerado foi $p < 0,05$. Os resultados dos coeficientes de difusão e outros parâmetros modelados foram apresentados como média \pm desvio padrão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cinética de Entrada e Saída dos Corantes

A análise das curvas temporais de concentração mostrou que tanto a elevação da temperatura (de 40°C para 60°C) quanto o aumento da concentração dos corantes (de 119 para 357 ppm) resultaram em aceleração significativa da taxa de penetração de ambos os corantes na cereja. Observou-se que, nos primeiros 40 a 60 minutos do processo de coloração, a diferença de concentração entre o meio externo e o interior do fruto é máxima, proporcionando o maior gradiente de força motriz para a difusão. Ao longo do tempo, com o avanço da saturação da matriz frutífera, a velocidade de penetração dos corantes diminui gradativamente e as curvas de concentração tendem à estabilização, indicando aproximação do equilíbrio dinâmico (Fig. 2).

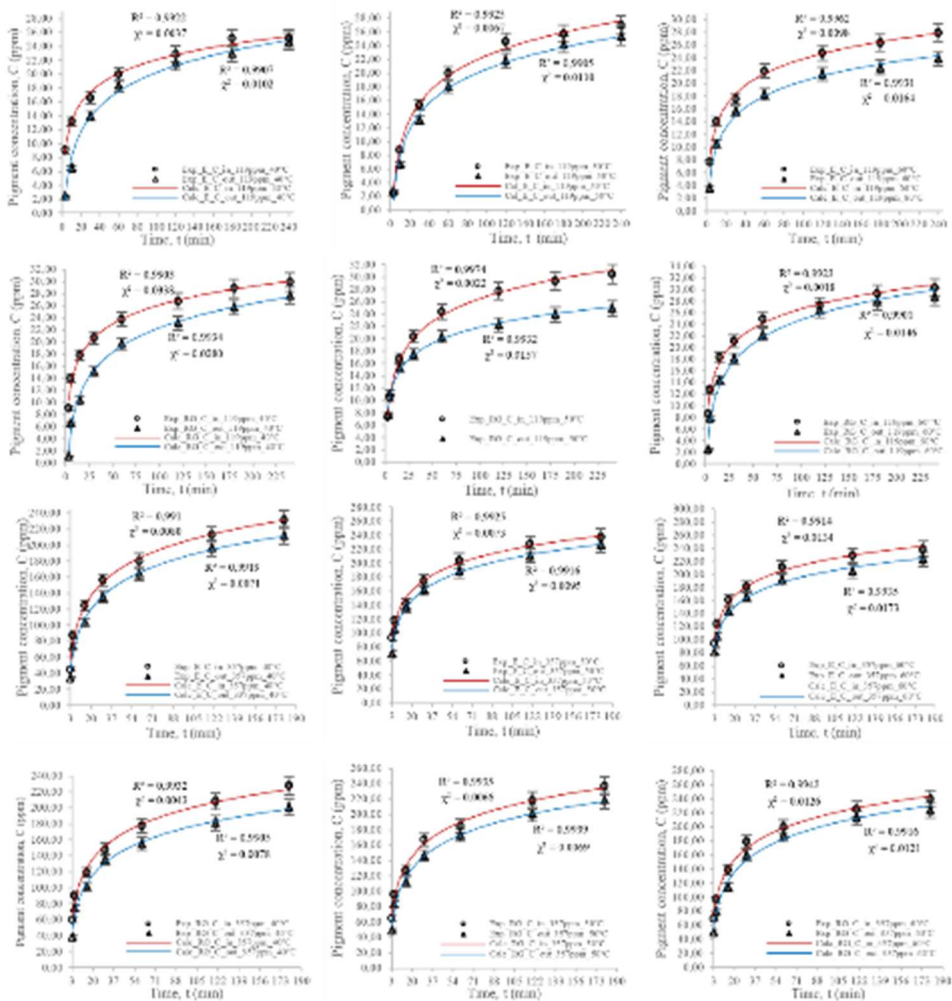


Figura 2 – Variações dependentes do tempo nas concentrações de entrada (in) e saída (out) dos corantes eritrosina (E) e gardênia vermelha (RG) a 119 e 357 ppm, e temperaturas de 40, 50 e 60 °C, ajustadas ao modelo analítico usando 220 termos da série infinita. Os valores de concentração obtidos através do modelo de esfera oca foram ajustados, resultando em coeficientes de determinação R^2 superiores a 99% e valores mínimos de qui-quadrado em todos os casos.

Fonte: Própria

Além disso, os valores de saída dos corantes obtidos por análise espectrofotométrica das soluções – foram consistentemente menores do que os valores de entrada, devido à retenção e precipitação dos corantes no interior do fruto, favorecida pela manutenção do pH entre 4,2 e 4,8. Esse controle tecnológico é fundamental para garantir maior fixação da cor, sendo um diferencial relevante do processo desenvolvido.

Difusividades Efetivas: Efeito da Temperatura e Concentração

O cálculo dos coeficientes efetivos de difusão revelou marcadas diferenças entre os corantes e entre os compartimentos do fruto (pele e polpa). Em geral, o gardenia vermelho apresentou coeficientes de difusão uma ordem de grandeza superiores aos da eritrosina em todas as condições avaliadas, tanto na pele quanto na polpa, evidenciando sua maior capacidade de migração e penetração na matriz. Esse comportamento é atribuído ao menor peso molecular do corante natural (388 g/mol) em relação ao sintético (880 g/mol), facilitando o trânsito pelas estruturas celulares do fruto (Fig. 3).

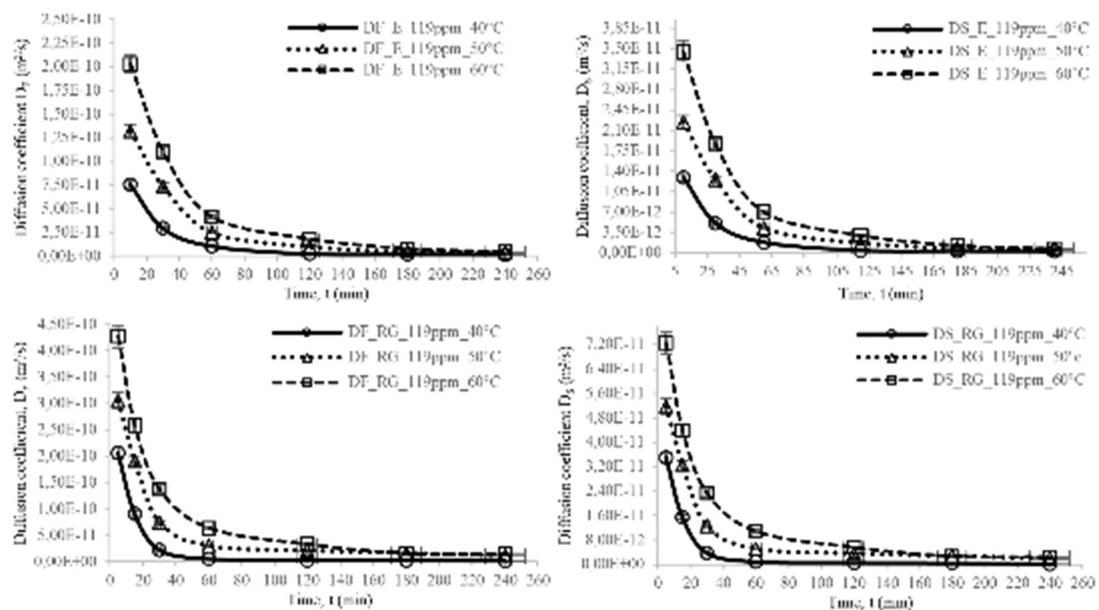


Figura 3 – Evolução dependente do tempo dos coeficientes de difusão efetivos para os corantes eritrosina (E) e gardênia vermelha (RG) na casca (DS) e na polpa (DF) da cereja a 119, 238 e 357 ppm e 40, 50 e 60 °C.

Fonte: Própria

Os valores de difusividade foram sistematicamente mais elevados para ambos os corantes à medida que aumentavam temperatura e concentração, com destaque para as condições ótimas (357 ppm a 60 °C), onde gardenia vermelho atingiu coeficientes na ordem de $3,89 \times 10^{-8} m^2/s$ na polpa e $6,61 \times 10^{-9} m^2/s$ na pele, enquanto a eritrosina ficou limitada a cerca de $6,96 \times 10^{-10} m^2/s$ e $1,18 \times 10^{-10} m^2/s$, respectivamente (48–50).

A epidermis da cereja se mostrou como uma barreira significativa, limitando a difusão: os coeficientes calculados para a pele foram entre uma e duas ordens de magnitude menores que aqueles medidos na polpa, alinhando-se com a literatura e reforçando a necessidade de considerar esse efeito em processos similares (51).

Perfis Espaço-Temporais e Análise de Superfície

Os mapas de distribuição espacial do parâmetro a^* (vermelhidão) ao longo do raio do fruto evidenciaram um avanço progressivo da coloração, mais intenso nas áreas próximas à superfície. As simulações numéricas, baseadas em elementos finitos e nas soluções analíticas de Fick para esferas ocas, reproduziram com notável precisão ($R^2 > 99\%$) o fenômeno físico, permitindo visualizar a formação de duplas barreiras de difusão na interface pele-polpa por meio de condições de contorno tipo Robin (Fig. 4).

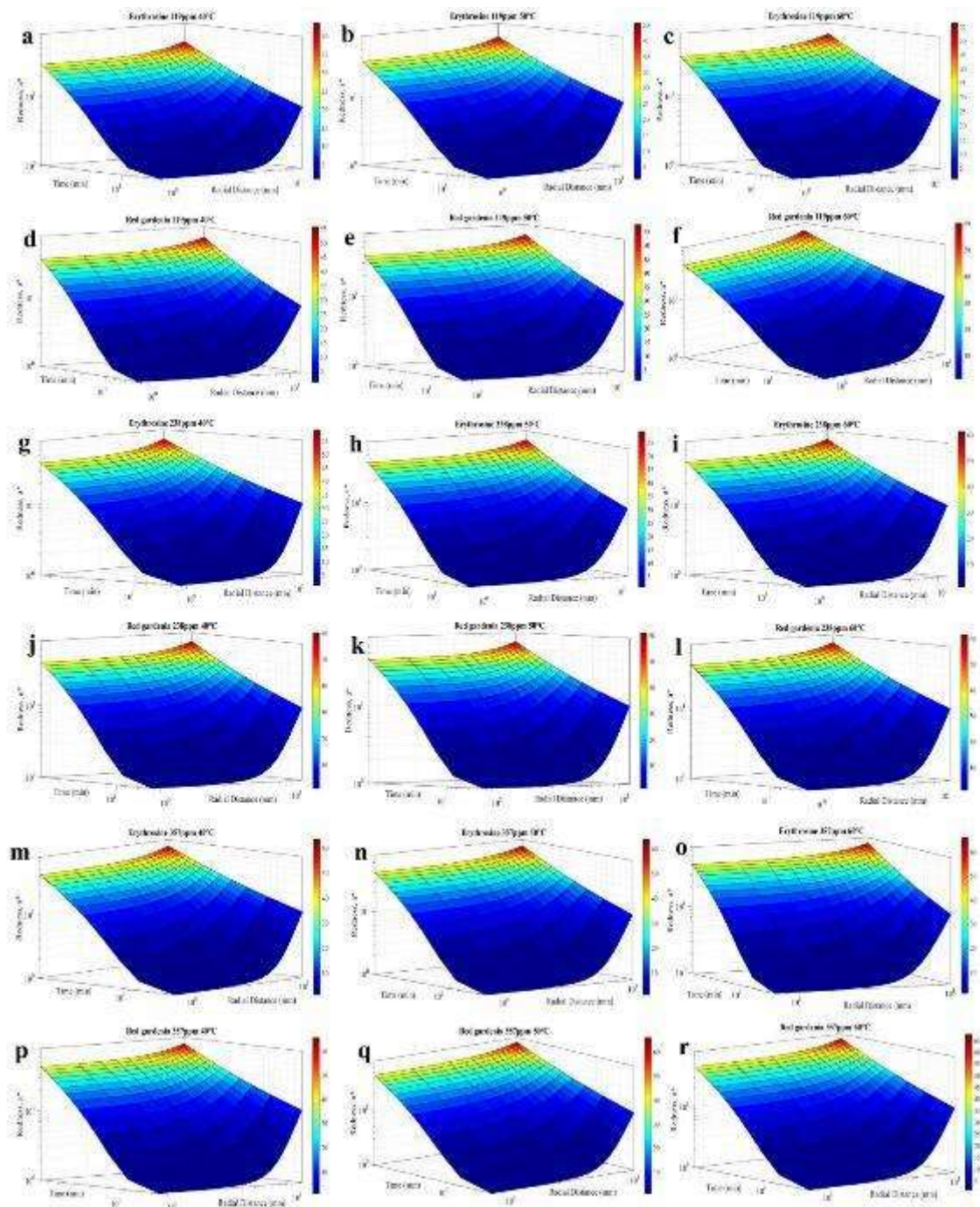


Figura 4 – Evolução dependente do tempo dos coeficientes de difusão efetivos para os corantes eritrosina (E) e gardênia vermelha (RG) na casca (DS) e na polpa (DF) da cereja a 119, 238 e 357 ppm e 40, 50 e 60 °C.
Fonte: Própria

Nestes mapas, as maiores intensidades de cor coincidiram com os pontos de contato entre a pele e a polpa, fato que corrobora a hipótese de permeabilidade diferencial das camadas superficiais e sua influência decisiva na cinética global de difusão (52–56).

Foi observado que, após cerca de 60 minutos, ocorre um decréscimo no gradiente de concentração entre o exterior e o interior da fruta, indicando um estágio de quase saturação da matriz. Isso não apenas reduz a força motriz para entrada adicional de corante, mas também pode ser um limitante operacional relevante quando se busca eficiência máxima em processos industriais.

Além disso, a quantidade de corante extraída em experimentos de saída foi limitada, evidenciando a retenção do pigmento na matriz pelo controle de pH, mantendo a coloração estável mesmo após longos períodos, um resultado tecnologicamente desejável para a indústria de frutas cristalizadas.

Comparação entre Eritrosina e Gardenia: Implicações Tecnológicas

O desempenho superior do gardenia vermelho em termos de velocidade de difusão e uniformidade de coloração, aliado ao benefício de ser um corante de origem natural e livre dos efeitos nocivos e regulatórios associados à eritrosina, demonstra a viabilidade técnica da substituição do corante sintético no contexto industrial. Além disso, a matriz adoçante sacarose-xilitol utilizada no estudo permitiu o desenvolvimento de produtos com menor teor calórico e propriedades prebióticas, respondendo a tendências atuais de mercado e saúde pública.

Tabela 2 – Coeficientes médios de difusão efetiva dos corantes eritrosina e gardenia vermelha na casca (DS) e na polpa (DF) da cereja durante os primeiros 60 minutos após o início do processo de coloração, em concentrações de 119, 238 e 357 ppm e 40, 50 e 60 °C, juntamente com parâmetros estatísticos fornecidos para indicar a incerteza associada ao modelo matemático

Corante	T(°C)	C(ppm)	D _F [†] (m ² /s)	n	p	R ²	RMSE	χ ²	
Eritrosina	40		3.87E-11±3.36E-11 ^{a,‡}	5	>0.05	0.9922	6.68E-02	3.70E-03	
	50	119	7.69E-11±5.34E-11 ^a	5	>0.05	0.9925	6.20E-02	6.70E-03	
	60		1.18E-10±8.12E-11 ^a	5	>0.05	0.9962	3.64E-02	9.80E-03	
	40		3.79E-11±8.59E-12 ^a	5	>0.05	0.9966	9.55E-02	2.60E-03	
	50	238	8.40E-11±3.50E-11 ^a	5	>0.05	0.9912	9.39E-02	9.40E-03	
	60		1.51E-10±1.73E-10 ^a	5	>0.05	0.9916	2.96E-02	8.20E-03	
	40		2.04E-10±2.21E-10 ^a	4	>0.05	0.9910	9.95E-02	8.00E-03	
	50	357	4.29E-10±3.89E-10 ^a	4	>0.05	0.9925	7.87E-02	7.30E-03	
	60		6.96E-10±6.43E-10 ^a	4	>0.05	0.9914	4.21E-02	1.34E-02	
		T(°C)	C(ppm)	D _S [†] (m ² /s)	n	p	R ²	RMSE	χ ²
		40		6.57E-12±5.71E-12 ^a	4	>0.05	0.9907	4.47E-02	1.02E-02
		50	119	1.31E-11±9.08E-12 ^a	4	>0.05	0.9905	2.82E-01	1.10E-02
		60		2.01E-11±1.38E-11 ^a	4	>0.05	0.9931	7.82E-02	1.64E-02
		40		8.04E-12±1.46E-12 ^a	4	>0.05	0.9968	7.94E-01	3.40E-03
		50	238	1.55E-11±5.96E-12 ^a	4	>0.05	0.9901	1.64E-01	2.37E-02
		60		2.56E-11±2.93E-11 ^a	4	>0.05	0.9905	4.49E-02	1.70E-02
		40	357	3.46E-11±3.76E-11 ^a	4	>0.05	0.9919	5.89E-02	7.10E-03

	50		7.28E-11±6.61E-11 ^a	4	>0.05	0.9916	1.45E-01	9.50E-03
	60		1.18E-10±1.09E-10 ^a	4	>0.05	0.9935	4.40E-02	1.73E-02
Corante	T(°C)	C(ppm)	D_F[†] (m²/s)	n	p	R²	RMSE	χ²
	40		1.07E-10±9.27E-11 ^a	4	>0.05	0.9903	3.31E-02	3.38E-02
	50	119	1.90E-10±1.15E-10 ^a	4	>0.05	0.9974	1.26E-02	2.20E-03
	60		2.74E-10±1.45E-10 ^a	4	>0.05	0.9923	5.62E-02	1.80E-03
	40		1.85E-10±7.58E-11 ^a	4	>0.05	0.9938	9.57E-02	1.03E-02
	50	238	1.99E-10±9.45E-11 ^a	4	>0.05	0.9941	8.47E-02	3.70E-03
	60		4.37E-10±2.31E-10 ^a	4	>0.05	0.9935	2.82E-02	8.20E-03
	40		1.43E-08±1.48E-08 ^{ab}	4	0.001	0.9932	5.58E-02	4.30E-03
	50	357	2.28E-08±1.95E-08 ^{ab}	4	0.001	0.9935	5.32E-01	6.60E-03
	60		3.89E-08±2.55E-08 ^b	4	0.001	0.9942	7.32E-02	1.26E-02
Gardênia Vermelha	T(°C)	C(ppm)	D_S[†] (m²/s)	n	p	R²	RMSE	χ²
	40		1.81E-11±1.57E-11 ^a	5	>0.05	0.9934	7.05E-02	2.80E-02
	50	119	3.23E-11±3.23E-11 ^a	5	>0.05	0.9932	4.77E-02	1.57E-02
	60		4.66E-11±2.47E-11 ^a	5	>0.05	0.9901	9.40E-02	1.46E-02
	40		1.94E-11±1.29E-11 ^a	4	>0.05	0.9936	6.07E-02	1.10E-02
	50	238	3.56E-11±1.60E-11 ^a	4	>0.05	0.9916	1.91E-01	1.20E-02
	60		4.03E-11±3.90E-11 ^a	4	>0.05	0.9918	1.19E-02	9.90E-03
	40		2.42E-09±2.52E-09 ^{ab}	4	0.002	0.9905	1.99E-02	7.80E-03
	50	357	3.87E-09±3.30E-09 ^{ab}	4	0.002	0.9939	8.37E-02	6.90E-03
	60		6.61E-09±4.34E-09 ^b	4	0.001	0.9916	8.98E-03	1.21E-02

†Os coeficientes de difusão efetivos na carne (D_F) e na pele (D_S) são apresentados como médias ± DP. ‡Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas (p<0,05). T: temperatura do ensaio, C: concentração do corante, p: valores p, n: tamanho da amostra, R²: coeficiente de determinação, RMSE: erro quadrático médio, χ²: valores qui-quadrado.

Fonte: Própria

A aplicação rigorosa de análises estatísticas (ANOVA, Tukey-Kramer, mínimos quadrados, valores de RMSE e χ²) assegurou a robustez e reprodutibilidade dos resultados. Diferenças estatisticamente relevantes (p < 0,05) foram observadas para gardenia vermelho nas diferentes temperaturas, enquanto para eritrosina, a estabilidade dos coeficientes indicou menor sensibilidade à variação térmica (Tabela 2).

Os coeficientes de difusão obtidos neste estudo se encontram em boa concordância com valores reportados para outros frutos submetidos a processos osmóticos e de coloração, tanto para materiais vegetais ricos em água (como maçã ou kiwi) quanto em modelagens similares de esferas ocas (57–60). Os efeitos de temperatura, barreira epidérmica e saturação cinética foram corroborados por outros autores, fortalecendo a validade dos achados e sua aplicação prática.

CONCLUSÕES

O presente estudo analisou, de forma integrada e detalhada, o comportamento difusivo dos corantes eritrosina (sintético) e gardenia vermelha (natural) em cerejas do tipo Bing submetidas a um processo de cristalização por impregnação múltipla com soluções de sacarose e xilitol. Os resultados obtidos demonstraram, de maneira conclusiva, que temperatura e concentração dos corantes atuam de forma sinérgica na intensificação dos coeficientes de difusão e na penetração do corante na matriz do fruto, sendo as condições ótimas identificadas em 357 ppm e 60 °C.

Observou-se que o corante gardenia, por apresentar menor massa molecular, possui difusividade significativamente superior à da eritrosina, atingindo coeficientes de difusão entre duas e três ordens de magnitude mais elevados, tanto na polpa quanto na epiderme. Isso implica em uma taxa de coloração mais rápida e mais uniforme, caracterizando o corante natural como alternativa viável e eficaz à eritrosina, não apenas por razões técnicas, mas também em alinhamento com as demandas de mercado por produtos naturais e seguros.

Adicionalmente, confirmou-se que a epiderme da cereja representa uma barreira física importante ao transporte de massa, com coeficientes de difusão até duas ordens de magnitude menores que os do mesocarpo (polpa). A modelagem matemática, tanto analítica quanto numérica, validou com alta precisão ($R^2 > 99\%$) o comportamento observado experimentalmente, possibilitando a visualização espaço-temporal dos perfis de concentração.

Portanto, o uso combinado do corante natural gardenia e do adoçante prebiótico xilitol oferece uma solução tecnológica segura, funcional e sustentável, com potencial de aplicação em escala industrial na produção de frutas cristalizadas e produtos similares, promovendo avanços na inovação alimentar voltada para saúde e qualidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às instituições CONICET, UTN FRM e UFCG.

REFERÊNCIAS

1. Bohra P, Waman AA, Roy TK, Shivashankara KS. Blood fruit (*Haematocarpus validus* (Miers.) Bakh. f. ex Forman): a novel source of natural food colourant. *J Food Sci Technol.* 2020;57(1).
2. Imchen T, Singh KS. Marine algae colorants: Antioxidant, anti-diabetic properties and applications in food industry. Vol. 69, *Algal Research.* 2023.

3. Vinha AF, Rodrigues F, Nunes MA, Oliveira MBPP. Natural pigments and colorants in foods and beverages. In: Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications. 2018.
4. Malabadi RB, Kolkar KP, Chalannavar RK. Plant natural pigment colorants-health benefits: toxicity of synthetic or artificial food colorants. *International Journal of Innovation Scientific Research and Review*. 2022;04(10).
5. Maldonado MB. Nuevos desafíos para la industria alimentaria y los nuevos conocimientos acerca del tercer cerebro. *Revista de Nutrición Clínica y Metabolismo* (Internet). 2021 Oct 8 (cited 2022 May 4);4(4):92–7. Available from: <https://revistanutricionclinicametabolismo.org/index.php/nutricionclinicametabolismo/article/view/326/562>
6. Weisbrod DB, Caruana DL, Li D, Wan L, Szema AM. A Case Report of Allergic Hypersensitivity to Color Additives in Slurpee® Beverages. *Yale Journal of Biology and Medicine*. 2023;96(1).
7. Sadighara P, Safta M, Limam I, Ghanati K, Nazari Z, Karami M, et al. Association between food additives and prevalence of allergic reactions in children: A systematic review. Vol. 38, *Reviews on Environmental Health*. 2023.
8. Singh M, Chadha P. Erythrosine-Induced Neurotoxicity: Evaluating Enzymatic Dysfunction, Oxidative Damage, DNA Damage, and Histopathological Alterations in Wistar Rats. *Journal of Applied Toxicology* (Internet). 2024 Apr 1 (cited 2025 Jun 21);45(4):576–86. Available from: /doi/pdf/10.1002/jat.4731
9. Lakdawalla AA, Netrawali MS. Erythrosine, a permitted food dye, is mutagenic in the *Bacillus subtilis* multigene sporulation assay. *Mutation Research/Genetic Toxicology* (Internet). 1988 Oct 1 (cited 2025 Jul 18);206(2):171–6. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0165121888901577>
10. Singh M, Chadha P. Dose-Dependent Hepatorenal Damage Induced by Erythrosine: A Study of Biochemical, Oxidative Stress, DNA Damage, and Histopathological Effects in Wistar Rats. *Journal of Applied Toxicology* (Internet). 2025 (cited 2025 Mar 18); Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jat.4754>
11. Singh M, Chadha P. Dose-Dependent Hepatorenal Damage Induced by Erythrosine: A Study of Biochemical, Oxidative Stress, DNA Damage, and Histopathological Effects in Wistar Rats. *Journal of Applied Toxicology* (Internet). 2025 May 1 (cited 2025 Jun 21);45(5):884–97. Available from: /doi/pdf/10.1002/jat.4754
12. Matula TI, Downie RH. Genetic toxicity of erythrosine in yeast. *Mutation Research/Genetic Toxicology* (Internet). 1984 Nov 1 (cited 2025 Jun 21);138(2–3):153–6. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0165121884900387?via%3Dihub>
13. Umai D, Kayalvizhi R, Kumar V, Jacob S. Xylitol: Bioproduction and Applications-A Review. Vol. 3, *Frontiers in Sustainability*. 2022.
14. Salli K, Lehtinen MJ, Tiihonen K, Ouwehand AC. Xylitol's health benefits beyond dental health: A comprehensive review. Vol. 11, *Nutrients*. 2019.
15. Gasmi Benahmed A, Gasmi A, Arshad M, Shanaida M, Lysiuk R, Peana M, et al. Health benefits of xylitol. Vol. 104, *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020.

16. Burgess ER, Taylor EE, Acevedo A, Tworek M, Nayduch D, Khurana N, et al. Diets of erythritol, xylitol, and sucrose affect the digestive activity and gut bacterial community in adult house flies. *Entomol Exp Appl*. 2021;169(10).
17. Asasta AR, Armando DW, Tissadharmma JC, Theo KA, Nobelta N. Sugar Alcohol: A Comparison of Xylitol and Sorbitol in Food Application. *Jurnal Global Ilmiah*. 2024;1(4).
18. Xiang S, Ye K, Li M, Ying J, Wang H, Han J, et al. Xylitol enhances synthesis of propionate in the colon via cross-feeding of gut microbiota. *Microbiome*. 2021;9(1).
19. Maldonado M, González Pacheco J. Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries. *Heliyon*. 2022 Jan 1;8(1):e08788.
20. Gusmão RP de, Souza Gusmão TA, Rangel ME, Cavalcanti-Mata M, Martins Duarte ME. Mathematical Modeling and Determination of Effective Diffusivity of Mesquite during Convective Drying. *Am J Plant Sci*. 2016;07(06).
21. Jongyingcharoen JS, Naweera W, Sangruangnak S, Assawadejmethakul A. Determination of Effective Moisture Diffusivity Considering Shrinkage for Vibration-Assisted Infrared Drying of Pumpkin. *BIO Web Conf (Internet)*. 2025 Jan 15 (cited 2025 Mar 19);150:03001. Available from: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2025/01/bioconf_icbae2025_03001/bioconf_icbae2025_03001.html
22. Pinheiro MNC, Castro LMMN. Effective moisture diffusivity prediction in two Portuguese fruit cultivars (Bravo de Esmolfe apple and Madeira banana) using drying kinetics data. *Heliyon*. 2023;9(7).
23. Pinheiro RMM, Da Silva WP, Miranda DSDA, E Silva CMDPS, Pessoa T, De Medeiros MS. Description of Osmotic Dehydration of Melon Cubes using a Three-dimensional Diffusion Model: An Algorithm to Determine the Effective Diffusivity. *International Journal of Food Engineering*. 2017;13(12).
24. de Lima Ferreira JP, da Silva WP, Paiva YF, Amadeu LTS. Impact of ultrasound pretreatment on banana chip production by convective drying using hot air: Consideration of shrinkage and variable effective mass diffusivity in the process description. *J Food Process Eng*. 2024;47(3).
25. Pandiselvam R, Tak Y, Olum E, Sujayasree OJ, Tekgül Y, Çalışkan Koç G, et al. Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *J Texture Stud (Internet)*. 2021 (cited 2021 Dec 16); Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jtxs.12643>
26. Yadav S, Tiwari KS, Gupta C, Tiwari MK, Khan A, Sonkar SP. A brief review on natural dyes, pigments: Recent advances and future perspectives. Vol. 5, *Results in Chemistry*. 2023.
27. Prabhu KH, Bhute AS. Plant based dyes and mordant: A Review Plant based natural dyes and mordants: A Review. *J Nat Prod Plant Resour (Internet)*. (cited 2021 Dec 20);2012(6):649–64. Available from: <http://scholarsresearchlibrary.com/archive.html>
28. Alegbe EO, Uthman TO. A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes. *Heliyon (Internet)*. 2024 Jul 15 (cited 2025

Mar 18);10(13). Available from:
<https://www.cell.com/action/showFullText?pii=S2405844024096774>

29. Alegbe EO, Uthman TO. A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes. *Heliyon* (Internet). 2024 Jul 15 (cited 2025 Jun 15);10(13):e33646. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024096774>
30. Maldonado M, González Pacheco J. Shrinkage phenomenon in cherries during osmotic dehydration. *Annals Food Science and Technology* (Internet). 2020 (cited 2021 Aug 25);21(1):19–30. Available from:
http://www.afst.valahia.ro/images/documente/2020/I.2_Maldonado.pdf
31. Kowalska H, Woźniak Ł, Masiarz E, Stelmach A, Salamon A, Kowalska J, et al. The impact of using polyols as osmotic agents on mass exchange during osmotic dehydration and their content in osmodehydrated and dried apples. *Drying Technology*. 2020;38(12).
32. Rubio-Arreaez S, Capella J V., Ortolá MD, Castelló ML. Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. *Int J Food Sci Technol*. 2015;50(9).
33. Rubio-Arreaez S, Capella J V., Ortolá MD, Castelló ML. Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. *Int J Food Sci Technol* (Internet). 2015 Sep 1 (cited 2023 Mar 1);50(9):2046–51. Available from:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ijfs.12859>
34. Cichowska J, Żubernik J, Czyżewski J, Kowalska H, Witrowa-Rajchert D. Efficiency of osmotic dehydration of apples in polyols solutions. *Molecules*. 2018;23(2).
35. Wahyuningsih S, Wulandari L, Wartono MW, Munawaroh H, Ramelan AH. The Effect of pH and Color Stability of Anthocyanin on Food Colorant. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* (Internet). 2017 Apr 1 (cited 2021 Dec 20);193(1):012047. Available from:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/193/1/012047>
36. Etxabide A, Kilmartin PA, Maté JI. Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. *Food Control*. 2021;121.
37. Azwanida NN, Hui MS, Afandi A, Mohamed S, K ZA, Ayob A, et al. Color Stability Evaluation of Pigment Extracted from *Hylocereus polyrhizus*, *Clitorea ternatae* and *Pandanus amaryllifolius* as Cosmetic Colorants and Premarket Survey on Customer Acceptance on Natural Cosmetic Product. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science (JTRSS)*. 2015;3(1).
38. Pereira MTL, de Oliveira Farias VS, da Silva Júnior AF, do Nascimento Lima AR, Vieira VB, de Medeiros RA, et al. Analysis of drying of melon peels using numerical solution of the diffusion equation. *J Food Process Eng*. 2023;46(3).
39. Majdi H, Esfahani JA, Mohebbi M. Optimization of convective drying by response surface methodology. *Comput Electron Agric*. 2019;156.
40. Martínez-Cañas MA, Calvo P, Rodríguez MJ, Sánchez FM, Plaza MA, González-Gómez D. Optimization of osmotic dehydration of cherry by response surface methodology. In: *Acta Horticulturae*. 2017.

41. González Pacheco JI, Maldonado MB. Diffusion in biological media: a comprehensive numerical-analytical study via surface analysis and diffusivities calculation. *Sci Rep* (Internet). 2024 Jul 17 (cited 2024 Jul 17);14(1):1–18. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67348-4>
42. González Pacheco JI, Maldonado MB. Mass transfer phenomena for erythrosine and red gardenia dyes in cherries (*Prunus avium*): influence of temperature on effective diffusion coefficients. 11th World Congress of Chemical Engineering (Internet). 2023 Jun (cited 2025 Mar 18); Available from: https://www.researchgate.net/publication/379332174_Mass_transfer_phenomena_for_erythrosine_and_red_gardenia_dyes_in_cherries_Prunus_avium_influence_of_temperature_on_effective_diffusion_coefficients
43. Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. Transport Phenomena. In: *Transport Phenomena*. 2nd ed. John Wiley & Sons; 2006.
44. Hahn DW, Özişik MN. Heat Conduction: Third Edition (Internet). *Heat Conduction: Third Edition*. John Wiley and Sons; 2012 (cited 2023 Dec 14). Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118411285>
45. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Oxford university press; 1979.
46. da Silva WP, Precker JW, e Silva CMDPS, e Silva DDPS. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. *J Food Eng*. 2009;95(2).
47. da Silva WP, Nunes JS, Gomes JP, de Araújo AC, e Silva CMDPS. Description of jambolan (*Syzygium cumini* (L.)) anthocyanin extraction kinetics at different stirring frequencies of the medium using diffusion models. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. 2018;54(11).
48. Kian-Pour N. Impact of Microwave-Starch-Blanching on the Drying Kinetics, Transport and Thermophysical Properties of Green Almond. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2023;13(1).
49. Kian-Pour N. Effect of Biopolymer Dip-Coating Pretreatments as a Non-Thermal Green Technology on Physicochemical Characteristics, Drying, and Rehydration Kinetics of Santa Maria Pears. *Foods*. 2023;12(13).
50. Kian-Pour N, Karatas S. Impact of different geometric shapes on drying kinetics and textural characteristics of apples at temperatures above 100 °C. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. 2019;55(12).
51. Giannakourou MC, Lazou AE, Dermesonlouoglou EK. Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in solutions of non-conventional sweeteners by response surface methodology and desirability approach. *Foods*. 2020;9(10).
52. Swe Oo K, Than SS. Osmotic dehydration of mango slices in sugar solution using response surface methodology. *EPH - International Journal of Applied Science*. 2019;5(3).
53. Bchir B, Sebi H, Danthine S, Blecker C, Besbes S, Attia H, et al. Efficiency of osmotic dehydration of pomegranate seeds in polyols solutions using response surface methodology. *Horticulturae*. 2021;7(9).

54. Zhelyazkov S, Aleksandrov S, Ruskova M, Petrova T, Gotcheva V, Penov N. Optimization of osmotic dehydration parameters for sweet cherries (*Prunus avium*) using response surface methodology. *Bulgarian Chemical Communications*. 2020;52(4).
55. Haque MR, Hosain MM, Kamal MM, Islam MR, Mondal SC. Optimization of osmotic dehydration parameters of banana under pulsed microwave conditions by response surface methodology. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020;9(6).
56. Meena N, Prince MV, Sreeja R. Optimization of process parameters for ultrasound-assisted osmotic dehydration of pineapple slices using response surface methodology. *J Food Process Preserv*. 2022 Sep 1;46(9).
57. Salehi F, Cheraghi R, Rasouli M. Mass transfer analysis and kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration of kiwifruit slices. *Sci Rep*. 2023;13(1).
58. Salehi F, Cheraghi R, Rasouli M. Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices. *Sci Rep*. 2022;12(1).
59. Pezo L, Lončar B, Filipovi'cfilipovi'c V, Šovljanski O, Traviči'traviči'c V, Filipovi'c JF, et al. Osmotic Dehydration Model for Sweet Potato Varieties in Sugar Beet Molasses Using the Peleg Model and Fitting Absorption Data Using the Guggenheim–Anderson–de Boer Model. *Foods* 2024, Vol 13, Page 1658 (Internet). 2024 May 25 (cited 2024 Jun 5);13(11):1658. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/11/1658/htm>
60. Khoualdia B, Ben-Ali S, Hannachi A. Pomegranate arils osmotic dehydration: effect of pre-drying on mass transfer. *J Food Sci Technol*. 2020;57(6).