



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós-Graduação em Ciência de
Alimentos

**DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SUCOS À BASE DE
FRUTAS E VEGETAIS: DO SUCO ANTIOXIDANTE AO PÓ SOLÚVEL**

JULIANE MARTINS DA SILVA DE ALMEIDA

Maringá

2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

A447d

Almeida, Jiuliane Martins da Silva de

Desenvolvimento e otimização de sucos à base de frutas e vegetais : do suco antioxidante ao pó solúvel / Jiuliane Martins da Silva de Almeida. -- Maringá, PR, 2024. 87 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Oscar de Oliveira Santos Júnior.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, 2024.

1. Sucos - Desenvolvimento e otimização . 2. Frutas e vegetais. 3. Suco antioxidante e pó solúvel. I. Santos Júnior, Oscar de Oliveira, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos. III. Título.

CDD 23.ed. 664.8

Marinalva Aparecida Spolon Almeida - 9/1094

JULIANE MARTINS DA SILVA

“DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SUCOS À BASE DE FRUTAS E VEGETAIS: DO SUCO ANTIOXIDANTE AO PÓ SOLÚVEL”

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência de Alimentos, para obtenção do grau de Doutor em Ciência de Alimentos.



Profa. Dra. Grasielle Scaramal Madrona,



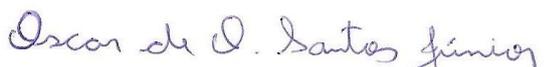
Prof. Dr. Benicio Alves de Abreu Filho,



Profa. Dra. Joana Schuelter Boeing



Profa. Dra. Suelen Pereira Ruiz Herrig



Prof. Dr. Oscar de Oliveira Santos Junior
Orientador

Maringá – 2024

JIULIANE MARTINS DA SILVA DE ALMEIDA

DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SUCOS À BASE DE FRUTAS E VEGETAIS: DO SUCO ANTIOXIDANTE AO PÓ SOLÚVEL

Tese apresentada ao programa de Pós Graduação em Ciência de Alimentos da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciência de Alimentos

Maringá

2024

Orientador

Oscar de Oliveira Santos Júnior

BIOGRAFIA

Juliane Martins da Silva de Almeida nasceu em 03 de junho de 1995 na cidade de Bataguassu, Mato Grosso do Sul, Brasil. Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá (2013-2017), Mestre em Engenharia de Alimentos pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (PEG) da Universidade Estadual de Maringá (2018-2020) e atualmente é doutoranda em Ciência de Alimentos na Universidade Estadual de Maringá (2020-2024). Membro do grupo de pesquisa: APLE-A no Departamento de Química na Universidade Estadual de Maringá. Fundadora da startup DAJIU Functional Foods. Empresária nas áreas de qualidade e segurança dos alimentos. Tem experiência nas áreas de Engenharia e Ciência de alimentos atuando principalmente nos seguintes temas: alimentos funcionais (prebióticos, inulina e oligofrutoses), produtos lácteos (sorvetes) e seus análogos (sem leite), extratos vegetais, técnicas de secagem de alimentos, qualidade e segurança dos alimentos.

Dedico

Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio e dedicação. Por não medirem esforços na minha educação e assim tornar esse sonho possível. Com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por sempre ter me abençoado tanto, pela oportunidade de realizar mais essa etapa nos meus estudos e ter me sustentado até aqui.

Aos meus pais, Florencio Pereira da Silva Júnior e Edinéia Martins da Silva pelo amor incondicional durante toda a minha vida, pelo apoio, dedicação e por não medirem esforços para me ajudar na realização de mais um sonho.

Ao meu esposo, Luiz Gabriel Bidóia de Almeida, pelo amor, companheirismo e apoio em todos os momentos. Obrigada pela família maravilhosa que você me proporcionou.

A toda minha família pela admiração e carinho.

Ao Professor Dr. Oscar de Oliveira Santos Júnior, por sua orientação e apoio para que meu trabalho fosse realizado, contribuindo de forma significativa na minha formação.

Ao professor Dr. Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli e à professora Dr^a. Graciette Matioli pela colaboração nas análises e resultados deste trabalho, além da paciência em transmitir conhecimento prático no laboratório.

A todos os meus professores, os quais foram minha inspiração para seguir esse caminho.

Aos meus amigos Zeinab E. H. Hussein, Thamara Thaianne da Silva Crozatti, Bruno Henrique Figueiredo Saqueti, Andreza Mendes e Juliana Harumi Miyoshi pela amizade e apoio durante essa jornada.

À secretária da pós-graduação em Ciência de alimentos, Marilda Ferreira Guimarães Nascimento, pelos conselhos, amizade e por sempre estar disposta a contribuir nessa etapa profissional.

À Universidade Estadual de Maringá pela estrutura concedida para a realização dos experimentos.

À banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar meu trabalho e pela contribuição com o mesmo.

À CAPES pela bolsa de doutorado concedida.

E por fim, não menos importante, a todos que de alguma forma contribuíram em mais essa etapa da minha vida

A apresentação da sua tese de doutorado é composta por dois artigos científicos:

1. Otimização do Potencial Antioxidante do Suco Misto de Vegetais: Uma Abordagem Quimiométrica

Juliane M. Silva, Zeinab E. H. Hussein, Lucas U. R. Chiavelli e Oscar O. Santos

Publicado na revista **Journal of the Brazilian Chemical Society** em 19 de abril de 2024.

DOI:

[10.21577/0103-5053.20240060](<https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20240060>) Páginas: 1-12

2. Otimização da secagem em esteira de espuma usando o Delineamento Composto Central para produção de pó de suco misto: um estudo de processo e caracterização

Juliane Martins Silva, Thamara Thaianne da Silva Crozatti, Bruno Henrique Figueiredo Saqueti, Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli, Graciette Matioli, Oscar Oliveira Santos

Publicado na revista **Food and Bioproducts Processing** em 04 de maio de 2024.

DOI: [10.1016/j.fbp.2024.04.009](<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.04.009>)

Disponível online, em pré-impressão.

GENERAL ABSTRACT

The demand for functional food products with nutritional benefits has significantly increased in recent years. This trend has propelled research efforts towards the development and optimization of innovative food formulations with high antioxidant potential. In this context, this study aimed to optimize the production process of a potentially antioxidant mixed fruit and vegetable juice powder and to evaluate the effect of vegetable combination on juice characteristics to optimize the proportion of mixture components; as well as to optimize the mixed juice powder through foam mat drying to achieve a high solubility index. Specifically, the study aimed to identify the optimal formulation and processing conditions for both liquid and powdered juice, considering factors such as ingredient composition, processing parameters, and final product characteristics.

The study is divided into two scientific articles, the first emphasizing the optimization of the formulation of a mixed fruit and vegetable juice, while in the second article, the focus is on optimizing the foam mat drying process to produce a mixed juice powder. Both studies highlight the importance of ingredients such as orange, apple, kale, and ginger, recognizing their antioxidant and functional potential.

The combination of these ingredients represents a promising strategy for creating food products that meet the growing demands for healthy and nutritious options. Additionally, the use of chemometric modeling techniques and analysis of phenolic compounds by ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry highlights the innovative approach adopted to optimize both the formulation and production process of the products.

The study employed a combination of experimental and chemometric approaches to optimize the formulations and processing conditions of the mixed juice and powder mixture. For the mixed juice, a chemometric modeling approach was used to optimize the proportion of vegetable components, evaluate the effect of vegetable combination on juice characteristics, and maximize antioxidant activity (DPPH assay). The mixed juice was evaluated for technological parameters such as soluble solids content, titratable acidity, density, viscosity, sedimentation, and color parameters. Phenolic compounds present in vegetables were identified using ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry (UHPLC-MS/MS).

On the other hand, foam mat drying combined with the Central Composite Design (CCD) was used to optimize the production process of mixed juice powder. The influence of process variables, including foaming agent concentration (5, 10, and 15% w/w), drying temperature (50, 60, and 70 °C), and foam thickness (2, 4, and 6 mm) on powder solubility and physical, chemical, technological, and bioactive compound characteristics was evaluated.

The results obtained in this study demonstrated the effectiveness of the optimization strategies employed for the production of a potentially antioxidant mixed juice and a soluble powder derived from fruits and vegetables. For the mixed juice, the optimal formulation consisted of a blend of orange, apple, kale, and ginger, which exhibited maximum antioxidant activity and desirable physicochemical properties. The special cubic model was considered significant ($p < 0.05$), with low dispersion and homogeneous antioxidant activity data (coefficient of variation (C.V.) = 3.73%) and being the most appropriate for statistical data analysis ($R^2 = 0.9937$). The optimal formulation of the mixed juice consisted of a blend (w/w) with orange (73.37%), apple (20.45%), kale (5.58%), and ginger (0.59%), presenting a validated antioxidant activity of $12534.2 \mu\text{mol mL}^{-1}$ and suitable physicochemical characteristics. The addition of orange juice resulted in a product with better functionality, due to the increased antioxidant capacity. Similarly,

the foam mat drying process resulted in a mixed juice powder with excellent solubility, color, and total carotenoid content, meeting the desired quality standards for functional food products. The optimal conditions were determined as drying temperature (60.27 °C), foam thickness (2.82 mm), and maltodextrin (8.56% w/w). The final product characterization revealed notable properties, including a soluble solids content of 8.75 °Brix, pH of 4.48 ± 0.01 , and water activity of 0.44 ± 0.04 . The analysis covered aspects related to color, porosity, sedimentation index, and solubility, highlighting a browning index of 0.81 ± 0.03 . The powder microstructure exhibited a variety of shapes, reflecting the stability of the foam.

This study successfully demonstrated the feasibility and efficacy of optimizing the production processes of mixed vegetable juice and fruit and vegetable powder mixture. The optimized formulations and processing conditions resulted in products with antioxidant potential, thereby contributing to the development of functional food products with nutritional profiles and health benefits.

The results highlight the optimization of formulations and the maximization of antioxidant activity. In article 1, chemometric modeling allowed for the formulation of an optimized mixed juice, with a combination of orange, apple, kale, and ginger, resulting in a validated antioxidant activity of $12534.2 \mu\text{mol mL}^{-1}$ and desirability of 1.00. The formulated mixed juice proved to be a source of antioxidant phenolic compounds, providing detoxification benefits and meeting consumer expectations. Conversely, in article 2, optimization of the foam mat drying process demonstrated ideal conditions for producing a mixed juice powder with excellent solubility, retention of bioactive compounds, and preserved physicochemical properties. These results contribute to reducing the costs of efficient dehydration techniques in the food industry, providing alternatives for advancing food processing technology. Therefore, this study presents a promising approach to the development of mixed juices, both in liquid and powder form, offering a healthy and accessible alternative for consumers, while driving progress in the food industry.

Keywords: Antioxidant, Mixed juice, Foam mat drying, Central Composite Design, Functional food.

RESUMO GERAL

A demanda por produtos alimentícios funcionais com benefícios nutricionais tem aumentado significativamente nos últimos anos. Essa tendência tem impulsionado os esforços de pesquisa em direção ao desenvolvimento e otimização de formulações alimentares inovadoras com alto potencial antioxidante. Nesse contexto, este estudo teve como principal objetivo otimizar o processo de produção de um suco misto de frutas e vegetais em pó potencialmente antioxidante e avaliar o efeito da combinação de vegetais nas características do suco para otimizar a proporção dos componentes da mistura; além de otimizar o suco misto em pó por meio da secagem em leito de espuma para obter um alto índice de solubilidade. Especificamente, o estudo visou identificar a formulação e as condições de processamento ideais tanto para o suco na forma líquida quanto em pó, considerando fatores como composição dos ingredientes, parâmetros de processamento e características do produto final.

O estudo é dividido em dois artigos científicos, o primeiro enfatiza a otimização da formulação de um suco misto de frutas e vegetais, enquanto no segundo artigo, o foco está na otimização do processo de secagem em leito de espuma para produzir um pó de suco misto. Ambos os estudos destacam a importância de ingredientes como laranja, maçã, couve e gengibre, reconhecendo seu potencial antioxidante e funcional.

A combinação desses ingredientes representa uma estratégia promissora para a criação de produtos alimentícios que atendam às demandas crescentes por opções saudáveis e nutritivas. Além disso, a utilização de técnicas de modelagem quimiométrica e análise de compostos fenólicos por cromatografia líquida de ultraeficiência com espectrometria de massas destaca a abordagem inovadora adotada para otimizar tanto a formulação quanto o processo de produção dos produtos.

O estudo utilizou uma combinação de abordagens experimentais e quimiométricas para otimizar as formulações e condições de processamento do suco misto e da mistura em pó. Para o suco misto, foi empregada uma abordagem de modelagem quimiométrica para otimizar a proporção de componentes vegetais, avaliar o efeito da combinação de vegetais nas características do suco e maximizar a atividade antioxidante (método DPPH). O suco misto foi avaliado quanto aos parâmetros tecnológicos, como teor de sólidos solúveis, acidez titulável, densidade, viscosidade, sedimentação e parâmetros de cor. Os compostos fenólicos presentes nos vegetais foram identificados por meio da técnica de cromatografia líquida de alta eficiência acoplada à espectrometria de massa (UHPLC-MS/MS).

Por outro lado, a secagem em leito de espuma combinada com o Delineamento Composto Central (DCC) foi utilizada para otimizar o processo de produção do suco misto em pó. Foi avaliada a influência das variáveis de processo, incluindo a concentração de agente espumante (5, 10 e 15% em massa), temperatura de secagem (50, 60 e 70 °C) e espessura da espuma (2, 4 e 6 mm) na solubilidade do pó e nas características físicas, químicas, tecnológicas e compostos bioativos.

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a eficácia das estratégias de otimização empregadas para a produção de um suco misto potencialmente antioxidante e um pó solúvel derivado de frutas e vegetais. Para o suco misto, a formulação ótima consistiu em uma mistura de laranja, maçã, couve e gengibre, que apresentou atividade antioxidante máxima e propriedades físico-químicas desejáveis. O modelo cúbico especial foi considerado significativo ($p < 0,05$), apresentando baixa dispersão e dados de atividade antioxidante homogêneos (coeficiente de variação (C.V.) = 3,73%) e sendo o mais apropriado para análise

estatística dos dados ($R^2 = 0,9937$). A formulação ótima do suco misto consistiu em uma mistura (m/m) com laranja (73,37%), maçã (20,45%), couve (5,58%) e gengibre (0,59%), apresentando uma atividade antioxidante validada de $12534,2 \mu\text{mol mL}^{-1}$ e características físico-químicas adequadas. A adição de suco de laranja resultou em um produto com melhor funcionalidade, devido ao aumento da capacidade antioxidante. Da mesma forma, o processo de secagem em leito de espuma resultou em um pó de suco misto com excelente solubilidade, cor e teor de carotenoides totais, atendendo aos padrões de qualidade desejados para produtos alimentícios funcionais. As condições ótimas foram determinadas como temperatura de secagem ($60,27^\circ\text{C}$), espessura da espuma (2,82 mm) e maltodextrina (8,56% em massa). A caracterização final do produto revelou propriedades notáveis, incluindo um teor de sólidos solúveis de $8,75^\circ\text{Brix}$, pH de $4,48 \pm 0,01$ e atividade de água de $0,44 \pm 0,04$. A análise abrangeu aspectos relacionados à cor, porosidade, índice de sedimentação e solubilidade, destacando um índice de escurecimento de $0,81 \pm 0,03$. A microestrutura do pó apresentou uma variedade de formas, refletindo a estabilidade da espuma.

Este estudo demonstrou com sucesso a viabilidade e eficácia da otimização dos processos de produção de suco misto de vegetais e mistura em pó de frutas e vegetais. As formulações e condições de processamento otimizadas resultaram em produtos com potencial antioxidante, contribuindo assim para o desenvolvimento de produtos alimentícios funcionais com perfis nutricionais e benefícios para a saúde.

Os resultados destacam a otimização das formulações e maximização da atividade antioxidante. No artigo 1, a modelagem quimiométrica permitiu formular um suco misto otimizado, com uma combinação de laranja, maçã, couve e gengibre, resultando em uma atividade antioxidante validada de $12534,2 \mu\text{mol mL}^{-1}$ e desejabilidade de 1,00. O suco misto formulado demonstrou ser uma fonte de compostos fenólicos antioxidantes, proporcionando benefícios de desintoxicação e atendendo às expectativas dos consumidores. Por sua vez, no artigo 2, a otimização do processo de secagem em espuma demonstrou condições ideais para a produção de um pó de suco misto com excelente solubilidade, retenção de compostos bioativos e características físico-químicas preservadas. Esses resultados contribuem para a redução dos custos de técnicas eficientes de desidratação na indústria de alimentos, fornecendo alternativas para o avanço da tecnologia de processamento de alimentos. Portanto, esse estudo apresenta uma abordagem promissora quanto ao desenvolvimento de sucos mistos, tanto na forma líquida quanto em pó, oferecendo uma alternativa saudável e acessível para os consumidores, ao mesmo tempo em que impulsiona o progresso na indústria de alimentos.

Palavras-chave: Antioxidante, Suco misto, Secagem em leito de espuma, Delineamento Composto Central, Alimento funcional.

**Otimização do Potencial Antioxidante do Suco Misto de Vegetais: Uma
Abordagem Quimiométrica**

Juliane M. Silva^a, Zeinab E. H. Hussein^a, Lucas U. R. Chiavelli^b, Oscar O. Santos^{a,b}*

*^aLaboratório de Ciência de Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Av.
Colombo, 5790, 87020-900 Maringá-PR Brazil*

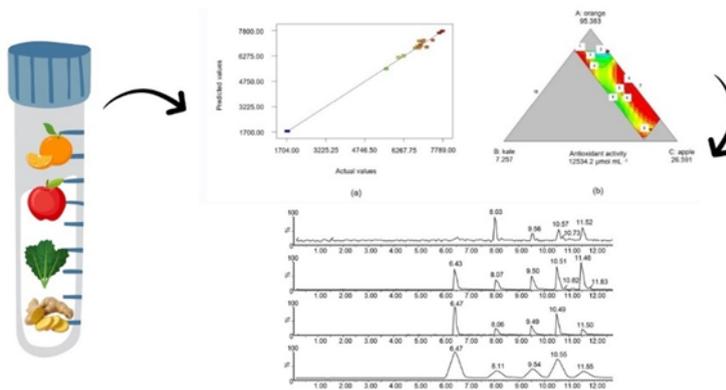
*^bLaboratório de Química de Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Av.
Colombo, 5790, 87020-900 Maringá-PR Brazil*

e-mail: oliveirasantos.oscardeoliveira@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-9631-8480

Resumo Gráfico

Figura do Resumo Gráfico :



- **Texto do Resumo Gráfico:** Este gráfico ilustra a otimização de uma formulação de suco misto, resultando em uma mistura ideal com alta atividade antioxidante.

Resumo

Este estudo teve como objetivo desenvolver um suco misto saudável e rico em antioxidantes. O efeito da combinação de vegetais nas características do suco foi avaliado, e a modelagem quimiométrica foi utilizada para otimizar a proporção dos componentes da mistura. A atividade antioxidante máxima foi considerada uma resposta variável. O suco misto foi avaliado quanto a parâmetros tecnológicos (teor de sólidos solúveis, acidez titulável, densidade, viscosidade, sedimentação e parâmetros de cor). Os compostos fenólicos presentes nos vegetais foram identificados pela técnica de Cromatografia Líquida de Ultra Alta Performance-Espectrometria de Massas (UHPLC-MS/MS). O modelo cúbico especial foi considerado significativo ($p < 0,05$), com baixa dispersão e dados de atividade antioxidante homogêneos (Coeficiente de Variação (C.V.) = 3,73%), sendo o mais apropriado para análise estatística dos dados ($R^2 = 0,9937$). A formulação ótima consistiu em uma mistura (m/m) com laranja (73,37%), maçã (20,45%), couve (5,58%) e gengibre (0,59%), com maior desejabilidade, 12534,2 $\mu\text{mol mL}^{-1}$ de atividade antioxidante validada e características físicoquímicas adequadas. A adição de suco de laranja resultou em um produto com melhor funcionalidade, devido ao aumento da atividade antioxidante. Este estudo inovador resultou em uma formulação funcional que envolve a combinação de vegetais de baixo custo com a máxima ação antioxidante possível, capaz de ajudar a proteger contra danos causados pelos radicais livres.

Palavras-chave: atividade antioxidante, modelagem quimiométrica, UHPLC-MS, suco misto, frutas e vegetais.

Introdução

Frutas e vegetais são alimentos naturalmente desintoxicantes, pois contêm antioxidantes biologicamente ativos que ajudam na eliminação de radicais livres potencialmente mutagênicos.¹ Consequentemente, vários componentes vegetais oferecem funções benéficas adicionais ao corpo, contribuindo para a promoção da saúde e bem-estar e reduzindo o risco de doenças crônicas.²

A laranja (*Citrus sinensis*) destaca-se como uma importante fruta cítrica, que contém uma variedade de fitoquímicos e compostos. Entre eles estão os polifenóis, como flavonoides e ácidos hidroxicinâmicos, que contribuem para o sabor e as propriedades gerais da fruta.³ A couve (*Brassica oleracea L. var. acephala L.*), um vegetal consumido globalmente, exibe um extrato com notável atividade antioxidante, propriedades antiulcerogênicas e potencial antígenotóxico. Além disso, contém um alto teor de flavonoides, principalmente derivados de kaempferol e quercetina.⁴ A maçã (*Malus domestica*) é uma fonte significativa de nutrientes e compostos bioativos para os humanos, sendo comumente usada como material de enchimento em sucos devido ao seu sabor neutro.⁵ O gengibre (*Zingiber officinale Roscoe*) é uma planta que contém uma variedade de nutrientes, fibras dietéticas e compostos voláteis, conhecido por suas substâncias biologicamente ativas não voláteis que possuem bons efeitos antioxidantes.⁶ A escolha dos quatro ingredientes específicos (laranja, maçã, couve e gengibre) para a otimização do suco misto é uma proposta estratégica que considera não apenas o potencial antioxidante individual, mas também a sinergia entre esses ingredientes, sua disponibilidade e baixo custo.³⁻⁶ Isso não só torna o suco acessível, mas também abre caminho para a produção em larga escala.

Na indústria de bebidas, os sucos de frutas desempenham um papel proeminente, servindo como matrizes para a incorporação de vários constituintes bioativos.⁷ Sucos

mistos têm sido desenvolvidos com diversas combinações, como romã, amla e melão; espinafre e outros vegetais comuns como graviola, abacaxi, manga e laranja; laranja, manga, kiwi, cenoura e abacaxi; entre outros.⁸⁻¹¹ Além disso, existem vários sucos mistos comerciais. No entanto, estudos envolvendo sucos mistos com formulações otimizadas ainda são raros. Nesse contexto, pesquisadores estão explorando ferramentas como alternativas viáveis para o desenvolvimento e a otimização de bebidas, visando preservar compostos bioativos e manter as características inerentes dos vegetais naturais, incluindo a modelagem de misturas.

A modelagem de misturas, uma abordagem matemático-estatística, visa otimizar processos experimentais aplicando combinações específicas de níveis de variáveis (formando uma matriz experimental) para extrair informações sobre o sistema estudado. Em outras palavras, um design de mistura é útil na otimização de formulações.¹² O design de mistura é uma ferramenta útil para otimizar formulações de produtos e investigar o papel dos ingredientes e sua interação na formulação final.¹³ Através dessa técnica, modelos matemáticos preditivos são gerados, relacionando fatores de mistura e suas respostas.¹³ Nesse sentido, experimentos de delineamento de mistura são úteis no desenvolvimento de produtos e têm sido utilizados na otimização de formulações de alimentos.^{14,12}

O método de Cromatografia Líquida de Ultra Alta Eficiência-MS (UHPLC-MS), conhecido por sua sensibilidade na detecção e caracterização de traços constituintes, tem ganho aprovação como uma técnica rápida para distinguir fitoquímicos e fornecer insights sobre a qualidade dos alimentos.¹⁴ Assim, foi empregado para determinar os compostos fenólicos presentes no suco misto e seus componentes. A introdução da modelagem quimiométrica e do método UHPLC-MS como ferramentas de otimização e análise, respectivamente, destaca uma mudança relativa nos processos de fabricação e

controle de qualidade na produção de sucos antioxidantes. Ao priorizar ingredientes de baixo custo, o estudo sugere que a produção em larga escala desses sucos otimizados pode manter a acessibilidade econômica, tornando os benefícios à saúde proporcionados pelos antioxidantes naturais disponíveis para uma ampla gama de consumidores. Empregando a modelagem quimiométrica, a pesquisa não só busca otimizar a formulação para garantir a máxima atividade antioxidante, mas também avalia as características tecnológicas do suco misto.^{2,7}

Até onde os autores têm conhecimento, nenhum estudo tem explorado a otimização de um suco misto potencialmente funcional combinando laranja, maçã, couve e gengibre com um alto teor de atividade antioxidante. Portanto, este estudo visa desenvolver um suco misto saudável, rico em antioxidantes, utilizando ingredientes facilmente disponíveis e de baixo custo, apresentando características físico-químicas adequadas. Adicionalmente, visa otimizar a proporção dos componentes (frutas e vegetais) por meio da modelagem quimiométrica e avaliar os efeitos combinados dos vegetais nas características do suco.

Experimental

Materiais

Laranja Pera Rio (*Citrus sinensis*), couve (*Brassica oleracea L. var. acephala*), maçã (*Malus domestica*) e gengibre (*Zingiber officinale Roscoe*) foram utilizados para preparar o suco misto. Para análises adicionais, os seguintes reagentes químicos foram usados: 2,2-Difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemanha),

ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico (Trolox) (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemanha) e metanol PA (Synth, São Paulo, Brasil).

Extração e Formulação dos Sucos Mistos

Foram adquiridos lotes de laranjas, maçãs, couve e gengibre (1 kg) no mercado local de Maringá-PR, Brasil. Os ingredientes foram lavados em água corrente, sanitizados com uma solução de hipoclorito de sódio (Merck, Darmstadt, Alemanha) (200 mg L^{-1}) por 15 minutos, enxaguados em água potável, descascados, cortados manualmente usando facas de aço inoxidável e pesados. As laranjas foram extraídas individualmente usando um processador de alimentos (E10, Mondial, Brasil). O suco de laranja, a couve, a maçã e o gengibre foram misturados em um liquidificador doméstico (L-550, Mondial, Brasil) por 3 minutos. As misturas foram coadas e reservadas para análises posteriores. Testes preliminares de formulações de "suco verde" da literatura foram desenvolvidos (Tabela 1). O suco foi formulado para ajustar a máxima atividade antioxidante, que foi medida como resposta ao experimento planejado. Para 130 g de bebida (g g^{-1}), quatro componentes principais variaram. Esses componentes representaram 100% em peso da formulação total. Um total de 20 formulações foram propostas pelo modelo de mistura e usadas para produzir as formulações, sendo 4 o ponto central.

A Tabela 1 apresenta informações importantes de estudos anteriores relacionados ao desenvolvimento de sucos mistos. Diante disto, o presente estudo propõe uma nova combinação de vegetais dentro do escopo mais amplo de estudos sobre formulações de sucos mistos.

Tabela 1. Resumo de algumas formulações de sucos mistos de frutas e vegetais na literatura.

N	Objetivos	Formulações	Referência
1	Otimizar a proporção da mistura de pós de brócolis, repolho e cenoura para desenvolver sucos em pó com altas quantidades de diversos compostos fenólicos, alta atividade antioxidante e preferência sensorial favorável, utilizando um design de mistura.	Pós de brócolis, repolho e cenoura como os ingredientes principais e utilizando uma proporção fixa de pós de maçã, tomate e rabanete como ingredientes secundários.	Kim <i>et al.</i> ¹
2	Descrever a disposição das crianças para experimentar, gostar e consumir smoothies à base de frutas contendo alguns vegetais (como espinafre, couves chinesas e couve), comumente conhecidos como "smoothies verdes", e explorar as diferenças individuais nas respostas alimentares das crianças.	Espinafre, couve chinesa, couve, morango, banana, suco de laranja 100%, leite de soja	Rollins <i>et al.</i> ¹⁵
3	Fazer um suco misto de frutas e compará-lo com um suco	25% suco de abacaxi, 20% suco de cenoura, 15% água	

	comercial que tem o nome "detox" no rótulo.	de coco, 15% suco de maçã, 10% suco de couve, 10% água potável, adicionado de 0,1% de gengibre (m/v), 0,1% de hortelã (m/v) e 1% de frutose (m/v).	Machado <i>et al.</i> ¹⁶
Tabela 1. Resumo de algumas formulações de sucos mistos de frutas e vegetais na literatura.			
4	Avaliar o efeito de comprimidos de onda únicos e múltiplos na qualidade microbiana e nos atributos físico-químicos e fitoquímicos da nova bebida mista formulada.	Suco de cenoura, alfarroba, gengibre, uva e limão.	Baykuş <i>et al.</i> ¹⁷
5	Investigar as mudanças de qualidade dos sucos mistos durante o armazenamento e explorar o potencial para criar um suco misto estável em prateleira com qualidade organoléptica semelhante à fresca por meio do Processamento de Alta Pressão.	Laranja, manga, kiwi, cenoura e abacaxi.	Li <i>et al.</i> ¹¹

6	<p>Avaliar o desenvolvimento de uma mistura de suco de Juçara e manga Ubá e a influência da pasteurização, alta pressão isostática (HPI) e adição de uma cultura probiótica de <i>Lactobacillus rhamnoses</i> nas características físico-químicas, microbiológicas, funcionais e sensoriais dos produtos obtidos.</p>	<p>Suco misto de Juçara e manga Ubá</p>	<p>Moreira <i>et al.</i>²</p>
7	<p>Fazer uma comparação dos métodos de secagem de polpas potencialmente desintoxicantes por liofilização e por atomização para determinar qual método preserva melhor as características do produto final.</p>	<p>Polpas congeladas compostas de abacaxi, hortelã e gengibre</p>	<p>Ibiapina <i>et al.</i>¹⁸</p>
8	<p>Misturar suco de laranja-amarga com suco de abacaxi em proporções adequadas para contribuir com a ingestão suficiente de antioxidantes naturais.</p>	<p>Laranja e abacaxi</p>	<p>Raji <i>et al.</i>¹⁹</p>
<p>Tabela 1. Resumo de algumas formulações de sucos mistos de frutas e vegetais na literatura.</p>			

9	<p>Investigar a composição de oxalato do suco verde preparado usando um liquidificador de alta velocidade em comparação com o suco preparado usando um espremedor mastigador, onde a fração de polpa foi descartada no processo.</p>	<p>Espinafre e outros vegetais comuns.</p>	<p>Vanhanen <i>et al.</i>⁹</p>
10	<p>Colaborar com uma empresa no desenvolvimento de novas técnicas para preservar sucos potencialmente detoxificantes, utilizando conservantes naturais que ainda não foram testados no mercado.</p>	<p>97.16% de melancia, 2.25% de limão, 0.37% de hortelã, 0.22% de gengibre por litro de suco.</p>	<p>Moraes <i>et al.</i>²⁰</p>
11	<p>Testar uma formulação de suco verde e avaliar suas propriedades. Para promover a estabilidade deste suco verde, gel de semente de chia e biossurfactante foram avaliados. Um tipo de gordura, dois emulsificantes naturais.</p>	<p>416,70 g de abacaxi (<i>Ananas comosus L. Merr.</i>), 0,70 g de cenoura (<i>Daucus carota</i>), 200 ml de água filtrada, 30,69 g de repolho (<i>Brassica oleracea</i>) e 182,51 g de pepino (<i>Cucumis sativus</i>).</p>	<p>Fraga <i>et al.</i>²¹</p>
12	<p>Otimizar a formulação de um coquetel de suco contendo</p>		

	graviola, abacaxi, manga e laranja, com base em aspectos físico-químicos e atributos sensoriais do coquetel.	Suco de graviola, abacaxi, manga e laranja.	Akonor <i>et al.</i> ¹⁰
Tabela 1. Resumo de algumas formulações de sucos mistos de frutas e vegetais na literatura.			
13	Desenvolver uma bebida mista de frutas incorporando sucos de romã, amla e melão usando análise sensorial e otimizar as formulações por meio de três métodos, a saber: otimização numérica da pontuação de aceitabilidade geral, classificação das formulações e aceitabilidade do consumidor.	Romã, amla e sucos de melão	Bhalerao <i>et al.</i> ⁸

^a N: representa o número de algumas formulações de suco misto presentes na literatura;

(M/V):Massa/Volume

Preparação da Solução de DPPH para Atividade Antioxidante

Atividade antioxidante (atividade de eliminação de radicais DPPH)

A atividade antioxidante (método DPPH) de diferentes formulações de suco misto foi determinada. Os dados foram avaliados utilizando o software Design Expert®. Para o padrão DPPH, curvas analíticas foram desenvolvidas utilizando o padrão Trolox em concentrações de 100 a 1500 $\mu\text{mol L}^{-1}$ e de 50 a 2000 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Uma solução estoque de DPPH $6.25 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ em metanol foi preparada. A partir da solução estoque, uma solução de trabalho foi preparada utilizando metanol como diluente, onde a absorbância dessa solução em 517 nm foi de 0,700. Foram utilizados 25 μL da amostra diluída em água na proporção de 1:3 a uma concentração de 1 mg mL^{-1} e 2 mL da solução de trabalho. Após a preparação das amostras, estas foram deixadas por 30 minutos no escuro. Em seguida, leituras de absorbância foram realizadas em 517 nm e metanol foi utilizado para zerar o instrumento. O resultado da atividade de eliminação do DPPH foi realizado em triplicata e expresso como a concentração equivalente de Trolox em $\mu\text{mol L}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de amostra. A modelagem de dados e o planejamento experimental usando D-otimização. Um planejamento experimental de mistura de quatro componentes foi utilizado para otimizar as proporções de ingredientes (componentes) na atividade antioxidante dos sucos mistos. O valor da atividade antioxidante para cada formulação foi calculado de acordo com uma curva de calibração com padrão Trolox contra o radical DPPH (Eq. 1).

$$Y = -0.0002x + 0.6956 \quad (1)$$

O modelo foi avaliado por Análise de Variância (ANOVA), mantendo os termos que mostraram efeitos com uma probabilidade de $P < 0,05$. Após analisar os modelos, o

modelo cúbico especial foi considerado mais adequado para a otimização experimental dos dados de atividade antioxidante.

A proporção ideal de mistura de suco foi determinada com base em otimizações numéricas e gráficas.¹⁶

Características físicas e químicas do suco misto

A viscosidade aparente do suco foi avaliada em amostras recém-preparadas a 25°C utilizando um viscosímetro (Visco Star plus, Fungilab, EUA) com uma velocidade constante de 200.0 rpm.

A acidez total foi avaliada de acordo com o AOAC (2002) por titulação com NaOH 0,1 mol L⁻¹ e expressa como % (método 947.05). O pH foi determinado por medição potenciométrica usando um pHmetro (MS Technopon®, Piracicaba, Brasil).

O teor total de sólidos solúveis foi determinado usando um refratômetro digital (Instrutherm®, São Paulo, Brasil), e os resultados foram expressos em °Brix. Os parâmetros de cor (L*, a*, b*) foram avaliados usando um colorímetro (Konica Minolta®, modelo CR-410, Tóquio, Japão) para os vegetais individuais e o suco otimizado.

O índice de sedimentação foi medido usando o método relatado por W. Wu et al.²³ com algumas modificações. Um tubo de centrífuga graduado foi preenchido com 10 mL de amostra de suco, centrifugado a 3000 rpm por 10 minutos e depois mantido em um forno a 40 °C por 24 horas, logo após o precipitado foi pesado. O índice de sedimentação (% m/m) foi expresso como a relação de peso do sedimento centrifugado para a amostra de suco. Os valores foram dados pela média de três repetições.

Quantificação de compostos fenólicos no suco misto por UHPLC-MS/MS

As amostras de suco foram preparadas usando uma centrífuga (Daiki, DT 4500, Japão) por 10 minutos a 4000 rpm a 25°C e o sobrenadante foi utilizado posteriormente. O sobrenadante foi filtrado através de uma seringa de politetrafluoretileno (PTFE) (33 mm de diâmetro e 0,45 µm de tamanho de poro) (Membrana PES - Polietileno Sulfonado, Filtril, Brasil) e armazenado em um frasco âmbar de 2,0 mL. Finalmente, 1,5 µL da fase móvel foi injetada no UHPLC-MS/MS para análise. Os extratos foram armazenados em freezer a -18°C e analisados dentro de um dia.

As análises foram realizadas em um sistema ACQUITY UHPLC® H-Class (Milford, MA, EUA) acoplado a um espectrômetro de massas triplo quadrupolo Xevo TQD™ (Milford, MA, EUA), equipado com uma fonte de ionização por spray eletrospray (ESI) Waters Z Spray™ (Milford, MA, EUA). As amostras foram injetadas na coluna ACQUITY UHPLC® C18 (50 mm × 2,1 mm ID, 1,7 µm) adquirida da Waters (Milford, MA, EUA). A espectrometria de massas foi operada no modo de ionização eletrospray negativo (ESI-), otimizado, e os parâmetros de ajuste foram os seguintes: voltagem do capilar, 3,0 kV; voltagem do cone, 21 V; voltagem do extrator, 3,0 V. A temperatura da fonte e do gás de dessolvatação foi ajustada para 130 °C e 550 °C, respectivamente. Nitrogênio foi utilizado como gás de cone e gás de dessolvatação com taxas de fluxo de 50 e 700 L h⁻¹, respectivamente.

A fase móvel utilizada foi composta de água ultrapura acidificada com ácido fórmico 0,1% (eluente A) e metanol acidificado com ácido fórmico 0,1% (eluente B), e a temperatura da coluna foi mantida a 30 ± 1°C. O volume de injeção foi ajustado para 1,5 µL. O programa de gradiente da fase móvel começou em 90% A e 10% B até 0,01 min; até 3 minutos, a composição foi de 40% A e 60% B; entre 4 e 5 minutos, a composição permaneceu constante em 20% para A e B; a partir de 5,5, a composição foi

0% A e 100% B, e de 7 a 9 minutos, a composição da fase A aumentou de 0% para 40%, enquanto a fase B diminuiu de 100% para 60%; de 11,50 a 16 minutos, a fase A permaneceu constante em 90% e a fase B constante em 10%.

Análise estatística

O delineamento de mistura ideal para otimização e os efeitos das variáveis foram desenvolvidos utilizando o software Design Expert® v-7.0 (Stat-Ease, Minneapolis, EUA)²⁵. Assim, os resultados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e os dados foram apresentados como média \pm desvio padrão.

Resultados e Discussão

Atividade antioxidante

Os resultados variaram consideravelmente de uma amostra para outra e estavam na faixa de 1704 a 7789 $\mu\text{mol mL}^{-1}$ (Tabela 2). As características de uma mistura de vegetais formulada por programação linear maximizam a atividade antioxidante e concluem que a eficácia do antioxidante natural depende da estrutura química do composto ativo e não pode ser explicada apenas pelos compostos fenólicos totais, mas requer a caracterização da estrutura do composto ativo.²⁰

A interação entre os componentes individuais da bebida mista foi modelada matematicamente em relação às respostas de atividade antioxidante. Além dos compostos fenólicos e vitamina C, existem outros componentes presentes na bebida mista de frutas e vegetais que também podem interferir na medição da capacidade antioxidante total, como vitamina E presente na couve e carotenoides presentes na couve e laranja.¹⁵ Os coeficientes e R^2 dos modelos de regressão foram ajustados aos dados experimentais.

Tabela 2. Projeto de mistura ótima para otimização de 20 formulações de suco misto com base em 4 compostos com restrições.

Número da Amostra	Variáveis Independentes				Atributo físico-químico
	L	C	M	G	Atividade antioxidante ($\mu\text{mol mL}^{-1}$)
1	89.617	7.384	32.000	0.999	6934 \pm 0.04
2	90.405	9.033	30.262	0.300	6264 \pm 0.03
3	100.000	9.855	19.145	1.000	6719 \pm 0.03
4	90.921	10.000	28.082	0.998	7164 \pm 0.02
5	95.498	10.000	23.503	0.999	6874 \pm 0.01
6	100.000	9.855	19.145	1.000	6879 \pm 0.01
7	94.409	8.908	25.683	1.000	6064 \pm 0.08
8	100.000	8.713	20.973	0.313	7394 \pm 0.03
9	91.570	7.00	31.130	0.300	7749 \pm 0.00
10	88.694	8.656	32.000	0.650	7669 \pm 0.01

11	89.617	7.384	32.000	0.999	6804 ± 0.01
12	99.997	7.000	22.214	0.789	1759 ± 0.03
13	87.664	10.000	31.992	0.344	6929 ± 0.00
14	97.167	8.046	23.834	0.953	5589 ± 0.06
15	87.009	10.000	31.997	0.994	6994 ± 0.04
16	88.694	8.656	32.000	0.650	7649 ± 0.01
17	98.278	10.000	21.200	0.522	6924 ± 0.03
18	100.000	8.713	20.973	0.313	7044 ± 0.01
19	94.081	7.000	28.619	0.300	7789 ± 0.03
20	99.997	7.000	22.214	0.789	1704 ± 0.02

(Atividade antioxidante expressa em $\mu\text{mol mL}^{-1}$). Os componentes são expressos em gramas e os valores da variável de resposta são apresentados como média \pm desvio padrão. Os resultados da mistura foram analisados por um modelo cúbico especial pelo software Design Expert® v-7.0. **Variáveis independentes: L (laranja); C (couve); M (maçã); G (gengibre).

A previsibilidade do modelo para atividade antioxidante foi alta (0,9937) e justificou um ótimo ajuste com termos de interação significativos e menos ruído. O valor F do modelo de 73,13 e o valor p ($p < 0,05$) mostraram que o modelo é significativo, com baixa dispersão e dados de atividade antioxidante homogêneos (CV = 3,73%) e que há apenas uma chance de 0,01% de que um "Valor F do Modelo" desse

tamanho possa ocorrer devido a ruído. Um valor p menor que 0,0500 indica que os termos do modelo são significativos.

Neste caso, os componentes da mistura linear, LC, LM, LG, CM, CG, MG, LCM, LCG, LMG e CMG, são termos de modelo significativos. O valor de 15,54 para "valor F de falta de ajuste" implicava que a falta de ajuste não é significativa e que há apenas uma chance de 1,09% de que uma "falta de ajuste" tão grande possa ser devido a ruído.

Diagnóstico das Propriedades Estatísticas dos Modelos

A interação entre os componentes da mistura resultou em uma boa correlação com o modelo cúbico especial e o modelo quadrático, com R^2 de 0,9937 e 0,9220, R^2 ajustado de (0,9801) e (0,8517), valores de desvio padrão mais baixos (240,12) e (656,10) respectivamente. Portanto, o modelo cúbico especial foi escolhido em termos de ajuste (Coeficiente de Variação (C.V.) = 3,73%), sendo o mesmo adequado para estimar a atividade antioxidante como resposta no presente estudo.

Table 3. Estatística e Análise de Variância (ANOVA) dos modelos.

Parâmetros	Modelos			
	Linear	Quadrático	Cúbico especial	Cúbico
Desvio padrão	1419.51	656.10	240.12	129.78
Média			6444.75	
C.V. (%) ^a			3.73	

(R ²) ^b	0.4155	0.9220	0.9937	0.9985
R ² ajustado	0.3059	0.8517	0.9801	0.9942
R ² previsto	0.0023	0.5411	-80.7967	
PRESS ^c	5.503 x 10 ⁷	2.531 x 10 ⁷	4.512 x 10 ⁹	
Precisão adequada			30,000	
Falta de testes de ajuste				
Soma dos quadrados	3.216 x 10 ⁷	4.221 x 10 ⁵	2.617 x 10 ⁵	0.000
Graus de liberdade	11	5	1	0
Quadrado médio	2.923 x 10 ⁶	8.441 x 10 ⁵	2.617 x 10 ⁵	
F-valor ^d	173.57	50.12	15.54	
p -valor ^e	< 0.0001	0.0003	0.0109	

^aC.V = Coeficiente de variação; ^bR² = Coeficiente de Regressão; ^c(PRESS) = Soma dos Quadrados dos Erros Residuais Previstos; ^d(f-value) = A Razão de Duas Variâncias; ^e(p-value) = Nível de significância marginal dentro de um teste de hipótese estatística.

Portanto, a equação final em termos de componentes L-pseudo para o modelo cúbico especial (Eq. 2) foi obtida.

$$\begin{aligned} \text{Atividade Antioxidante} = & -10471.23 * L + 005C + 2677.48M + 6,739E+006 G + 005 L * C \\ & + 43653.78 L * M + 006 L * G + 005 C * M + 007 C * G + 006 C * G + 005 L * C * M + 007 \\ & L * C * G + 006L * M * G + 007 C * M * G \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde L, M, C e G representam a concentração de laranja, maçã, couve e gengibre, respectivamente; e as constantes são coeficientes, que significam os efeitos de interação das variações simultâneas de dois ou mais variáveis independentes na atividade antioxidante da mistura.

Projeto de mistura

Escolha de ingredientes

A cor das frutas e vegetais é consistente com seu teor antioxidante e, conseqüentemente, sua capacidade antioxidante. A mistura desses vegetais resulta em bebidas com atividade antioxidante maximizada, uma vez que é composta por frutas e vegetais, que são alimentos desintoxicantes por natureza, pois contêm antioxidantes biologicamente ativos. Além disso, o suco de laranja, couve e gengibre são os componentes mais utilizados para preparar sucos mistos devido à sua disponibilidade e preço acessível. Estes sucos mistos são bem aprovados sensorialmente, pois vegetais de cor verde escura, quando misturados com frutas mais doces, têm grande potencial para resultar em produtos mais aceitáveis, uma vez que a doçura desses ingredientes tende a minimizar o sabor amargo.

Otimização da formulação de suco misto

O processo geral de otimização para formulações de bebidas é mostrado na Figura 1a. Portanto, a formulação otimizada foi laranja: maçã: couve: gengibre = 95,383: 26,591: 7,257: 0,769 (m/m) (Figura 1b).

O gráfico gerado de valores previstos versus valores reais é ilustrado abaixo (Figura 1(a)).

Os pontos apresentados no gráfico indicaram linearidade entre os dados, o que implicou normalidade no termo de erro. Portanto, com esse padrão linear, foi possível afirmar que os dados são consistentes e que não há sinais de problemas, e assim o modelo foi considerado adequado para otimizar a formulação do suco misto.

O diagnóstico de valores previstos versus valores reais não revelou problemas estatísticos, o que também foi confirmado usando o gráfico de superfície de resposta (Figura 1(a)).

Na otimização gráfica, a região de sobreposição no gráfico foi representada como a faixa ótima destacada, de modo que as faixas de contorno coloridas representavam o intervalo de valores ajustados de atividade antioxidante (Figura 1b). O gráfico de contorno 2D aparecia em sombreamento colorido graduado no gráfico de atividade antioxidante em função de três componentes da mistura. Este corte incluía dois centróides, conforme indicado pelo ponto vermelho e o número "2" no meio do gráfico de contorno.

O diagrama ternário, ou triângulo de mistura, foi utilizado para representar a otimização da mistura de componentes, pois é uma representação visual simples e intuitiva que permite mostrar graficamente a proporção relativa de três componentes em uma mistura. Isso é útil, uma vez que este trabalho trata de três variáveis independentes, onde a combinação ideal de laranja, maçã e couve é determinada. Qualquer ponto em um dos vértices representa a resposta esperada para a mistura pura, os pontos localizados nos lados representam misturas binárias e qualquer ponto na região interna, misturas ternárias.

A Figura 1(b) mostra que há um aumento no potencial antioxidante do suco misto de acordo com a interação da mistura binária de laranja e maçã, uma vez que o potencial antioxidante ($12534,2 \mu\text{mol mL}^{-1}$) foi otimizado nesta região do gráfico.

A proporção de mistura ideal determinada a partir da otimização numérica teve as seguintes proporções de ingredientes: laranja: maçã: couve: gengibre = 95,383: 26,591: 7,257: 0,769 (m/m). Os mesmos valores foram obtidos nos modelos de otimização gráfica (Figura 1(b)).

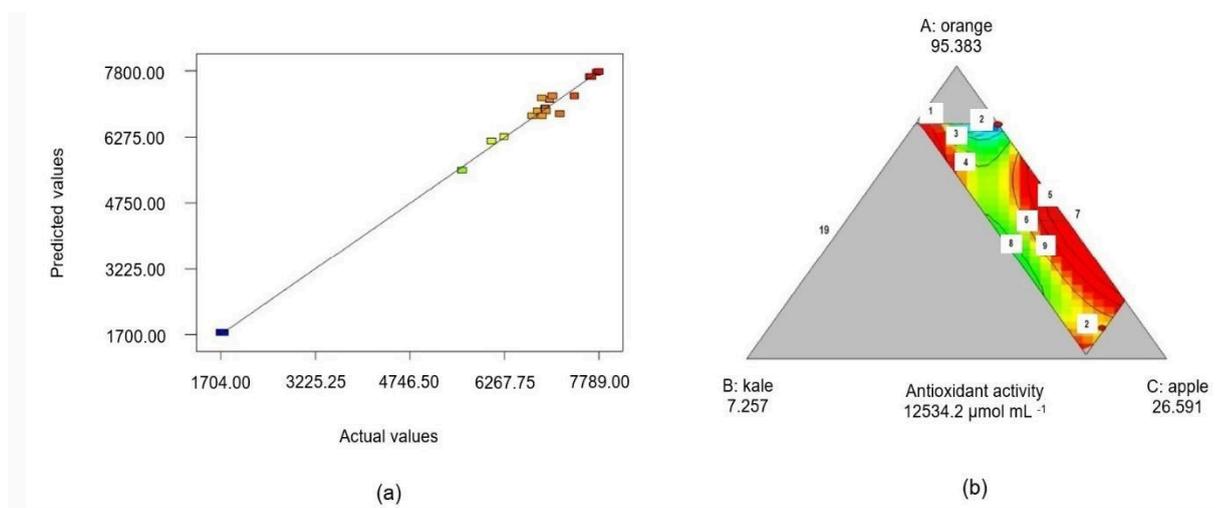


Figura 1. (a) Gráfico de valores previstos versus valores reais para atividade antioxidante. (b) Gráficos de contorno da superfície de resposta (atividade antioxidante) mostrando a interação relativa entre os três constituintes ($x_1 = A$: Laranja), ($x_2 = B$: Couve), ($x_3 = C$: Maçã) do suco misto de vegetais; (1 = 7465.03), (2 = 2), (3 = 3234.98), (4 = 5350), (5 = 11695.1), (6 = 7465.03), (7 = 7), (8 = 5350), (9 = 9580.05), (19 = 19) $\mu\text{mol mL}^{-1}$. Fonte: Próprio autor - Software Design Expert® v-7.0 (2022).

Os escores de desejabilidade (D_i) obtidos após a otimização numérica para atividade antioxidante variaram entre 0,306 e 1,00. O escore de desejabilidade foi utilizado devido à facilidade de interpretação que proporciona, pois um único escore de desejabilidade simplifica a interpretação e comunicação dos resultados, tornando mais fácil entender e implementar a formulação otimizada. A otimização numérica foi direcionada para obter um valor máximo de D_i com a maior importância atribuída à resposta. Sendo um suco potencialmente funcional e detoxificante, foi otimizado para

ter maior atividade antioxidante na mistura. Dado o exposto, os valores previstos pelo modelo são aqueles obtidos na pesquisa, e assim, é demonstrado que o modelo prevê os resultados obtidos.

Propriedades tecnológicas dos sucos

Os sucos apresentaram valores de pH variando de 4,42 a 7,02, acidez titulável entre 0,07 e 9,67%, teor de sólidos solúveis (TSS) de 0,4 a 10,63 °Brix, densidade de 0,68 a 1,04, viscosidade de 121.517 a 292.550 mPa.s e índice de sedimentação de polpa entre 0,02 e 0,16% (Tabela 4).

Tabela 4. Propriedades tecnológicas dos componentes individuais e suco misto otimizado *.

Parâmetros	Formulações ^{a,b}				
	S.M	L	C	M	G
L* ^c	33.29 ± 0.31	31.87 ± 0.46	26.05 ± 0.01	28.42 ± 0.01	30.51 ± 0.20
a* ^c	-6.22 ± 0.22	-1.90 ± 0.01	-2.59 ± 0.09	0.12 ± 0.02	-1.01 ± 0.10
b* ^c	11.43 ± 0.33	6.32 ± 0.08	4.85 ± 0.04	4.79 ± 0.03	2.61 ± 0.05
pH	4.52 ± 0.02	4.42 ± 0.03	6.75 ± 0.21	4.85 ± 0.11	7.02 ± 0.42
TSS ^d (°Brix)	8.57 ± 0.12	8.03 ± 0.12	0.4 ± 0.08	10.63 ± 0.12	0.15 ± 0.04
Acidez titulável (%)	8.26 ± 0.10	9.67 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.87 ± 0.13	0.07 ± 0.02
Densidade (g mL ⁻¹)	1.04 ± 0.01	1.03 ± 0.01	0.68 ± 0.49	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.00
Viscosidade (mPa.s)	292550 ± 328.73	209214 ± 421.02	161519 ± 294.77	156134 ± 347.80	121517 ± 329.70
Índice de sedimentação (%)	0.16 ± 0.04	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.05 ± 0.03	0.02 ± 0.00

^aMédias \pm desvio padrão na mesma linha acompanhadas por letras diferentes são significativamente diferentes ($P < 0.05$). ^bFormulações: L (laranja); M (maçã); C (couve); G (gingibre); S.M. (suco misto). ^cL* varia de 0 (preto) a 100 (branco); a* varia de vermelho (+a*) a verde (-a*); e b* varia de amarelo (+b*) a azul (-b*). ^dTSS: Teor de Sólidos Solúveis.

A adição de frutas como laranja e maçã contribuiu em maior proporção para a intensidade da acidez do suco misto (8,26%, Tabela 4), uma vez que a intensidade da acidez depende do tipo de vegetal utilizado. A laranja promoveu a acidez no suco misto em maior proporção (9,67%) e o gengibre contribuiu com uma menor proporção (0,07%) entre as frutas e vegetais. As frutas cítricas são bem conhecidas pelo seu aroma refrescante e conteúdo de ácido ascórbico, além disso, o equilíbrio de sabor (relação açúcar/ácido), cor, ausência de substâncias amargas (limonina), quantidade de ácido ascórbico, grau de turbidez e quantidade de polpa amolecida são as principais características desejadas nas laranjas em termos de qualidade do suco; além disso, a laranja e o gengibre têm sido utilizados como agentes aromatizantes naturais, conservantes, estabilizantes durante várias formulações de alimentos e confeitos devido ao seu aroma, açúcar ou acidez.^{8,18}

Foi observado um maior conteúdo de sólidos solúveis no suco misto (8,57 °Brix) em comparação ao suco de gengibre (0,15 °Brix) e à couve (0,4 °Brix), o que já era previsto, pois o conteúdo de sólidos solúveis é usado para medir a quantidade aproximada de açúcares, que são os sólidos solúveis predominantes em frutas como laranjas (8,03 °Brix) e maçãs (10,63 °Brix). A adição de frutas aos alimentos pode causar um aumento no conteúdo total de sólidos, uma vez que a presença de fibras solúveis na fase aquosa aumenta os sólidos totais nessa fase.²³ Os resultados corroboram os dados obtidos por Machado et al., 2017, que obtiveram 8 °Brix para suco misto contendo maçã, couve e gengibre, entre outros ingredientes.¹⁶

Como esperado, o suco misto apresentou um valor de pH ácido (4,52) e não houve grande influência da adição de couve e gengibre no pH, acidez titulável, teor de sólidos solúveis e índice de sedimentação da polpa, já que os valores desses parâmetros para o suco misto estavam mais próximos dos encontrados nos componentes individuais de laranja e maçã para pH, acidez titulável, TSS, densidade e viscosidade. Ibiapina et al.¹⁸ encontraram um pH ligeiramente mais baixo (3,15) para suco misto de abacaxi, hortelã e gengibre. Além disso, a formulação do suco misto teve o maior índice de sedimentação da polpa (0,16%). Logo após a extração do suco, as partículas grossas se depositam imediatamente pela gravidade, enquanto as finas permanecem em suspensão, e ainda assim, a sedimentação tem sido um grande desafio para a indústria de bebidas.¹¹

Os valores de L*, a* e b* para o suco misto otimizado foram (33,29; -6,22; 11,43), suco de laranja (31,87; -1,90; 6,32), suco de laranja com couve (26,05; -2,59; 4,85), suco de maçã (28,42; 0,12; 4,79) e suco de gengibre (30,51; -1,01; 2,61) respectivamente (Tabela 4).

Em geral, a luminosidade (L*) em todos os sucos é relativamente baixa, pois compostos fenólicos naturais podem absorver luz. Além disso, o valor de L* (33,29) para a amostra otimizada tende a se aproximar da luminosidade da laranja, devido a alguns compostos presentes no suco de laranja, como polifenóis, carotenoides e outros pigmentos.²⁶ Resultados semelhantes foram obtidos em amostras de bebidas mistas contendo couve, gengibre, água de coco e laranja, que apresentaram um valor médio de 30,73 em luminosidade, indicando que a bebida era escura. A presença de pequenas partículas suspensas nas amostras de bebidas pode ter influenciado os baixos valores de luminosidade e aumentado a viscosidade do suco misto em comparação com os sucos vegetais utilizados.¹⁵

A cor verde do suco misto é indicada por valores negativos de a^* (-6,22). Um valor mais alto para b^* é atribuído ao suco de laranja. A degradação do pigmento verde claro da clorofila, devido à couve, pode ser atribuída a danos celulares causados durante o processamento, que levam à quebra das moléculas de clorofila, que estão associadas aos carotenoides e, em condições normais, mascaram a coloração destes. Com o dano celular após o processamento, uma coloração mais amarelada é destacada, derivada de biomoléculas como carotenoides, polifenóis e flavonoides presentes na couve e na laranja.²⁶

Perfil de compostos fenólicos do suco misto

Dez compostos fenólicos foram identificados usando o método UHPLC-MS/MS, incluindo 5 ácidos (cafeico, clorogênico, gálico, ferúlico e p-cumárico), 1 álcool (kaempferol), 1 polifenol (catequina) e 3 flavonoides (epicatequina, quercetina e naringenina) (Tabela 5). A propriedade antioxidante e a bioatividade do suco misto provêm da composição da mistura, que é composta por vegetais como laranja, maçã, couve e gengibre, ricos em compostos fenólicos.²⁷

Tabela 5. Compostos fenólicos identificados por UHPLC-MS/MS** em sucos frescos e componentes de sucos.

Compostos fenólicos	Fórmula Estrutural	RT*** (min)	Íon precursor (m/z)	Produto Íon (m/z)
Kaempferol ^{1*5*}	$C_{20}H_{18}O_{10}$	10.79	285	151
				255
Catequina ^{2*5*}	$C_{15}H_{14}O_6$	8.59	289	179
				245

Epicatequina ^{5*}	C ₂₁ H ₂₄ O ₁₁	8.05	289	179
				245
Ácido cafeico ^{5*}	C ₉ H ₈ O ₄	8.86	179	117
				135
Ácido clorogênico ^{1*,2*,3*,5*}	C ₁₆ H ₁₈ O ₉	8.26	353	85
				191
Ácido gálico ^{1*,3*,5*}	C ₁₃ H ₁₆ O ₁₀	6.51	168.9	78.9
				124.9
Ácido ferúlico ^{5*}	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	9.42	193	134
				178
Quercetina ^{1,5}	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	10.11	301	121
				151
Ácido p-cumárico - ^{1,3,5}	C ₉ H ₈ O ₃	9.26	163	119
				92.9
Naringenina ^{1,5}	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	10.09	271	119
				151

^{*1} = (amostra de suco de laranja), ² = (amostra de suco de maçã), ³ = (amostra de suco de couve), ⁴ = (amostra de suco de gengibre), ⁵ = (amostra de suco misto); **UHPLC-MS/MS: Cromatografia Líquida de Ultra-Alta Eficiência-MS; ***RT: Tempo de Retenção; (m/z): razão massa/carga

Os polifenóis são metabólitos presentes em todos os tecidos vegetais, tanto nas flores quanto nos frutos, que são matrizes representativas por conterem uma quantidade significativa de polifenóis que podem ser utilizados na indústria alimentícia.²⁸

O uso de laranja no suco misto resultou em um suco com grande potencial

funcional, já que os fenólicos são os compostos bioativos predominantes nesta fruta e o perfil dos compostos fenólicos da laranja (kaempferol, ácido clorogênico, ácido gálico, quercetina, ácido p-cumárico e naringenina) é semelhante ao produto otimizado. De maneira semelhante, estudos anteriores relataram que o ácido clorogênico e a naringenina foram os dois flavonoides dominantes nas laranjas.¹¹

A presença de vários compostos fenólicos e atividade antioxidante foi observada na formulação do suco misto, um resultado esperado porque as frutas nativas usadas no estudo possuem esses compostos.²⁹ Outros autores também identificaram compostos fenólicos (limonina, nomilina, hesperidina, neohesperidina, naringina, ácido clorogênico, ácido ascórbico e carotenoides totais, conteúdo fenólico total) e atividade antioxidante em sucos cítricos.²⁹ Os fenólicos foram identificados nas amostras de suco vegetal utilizadas e no suco misto (Tabela 5), então no suco misto obteve-se a presença de todos os compostos, o que potencializou a funcionalidade do suco misto.

A relação entre os compostos fenólicos encontrados nas amostras individuais de suco mostrou que o suco de laranja contribuiu com a maior quantidade de compostos fenólicos no suco misto (6 compostos), enquanto o suco de gengibre não contribuiu. A laranja é uma fonte subutilizada de antioxidantes que pode ajudar a conter doenças degenerativas.¹¹

Os polifenóis foram identificados como o grupo mais relevante de fitoquímicos provenientes de resíduos do processamento de frutas e vegetais como fontes naturais de extratos ricos em antioxidantes.³⁰ Os resultados também corroboram os dados obtidos por He et al.³¹, nos quais o suco de maçã continha mais compostos fenólicos (ácidos hidroxicinâmicos) do que as sidras correspondentes. Machado et al.¹⁶ elaboraram um suco misto com potencial "detox", contendo abacaxi, cenoura, água de coco, maçã, suco de couve, gengibre e hortelã, e obtiveram teores fenólicos totais de 81,38 mg EAG.100

g⁻¹. A atividade antioxidante de frutas e vegetais é atribuída, além de outros fatores, a compostos do metabolismo secundário: fenólicos. Em resumo, o suco misto em estudo é potencialmente um alimento rico em compostos antioxidantes, pois apresenta uma combinação de compostos fenólicos presentes nos sucos individuais.³¹⁻³³

Conclusões

O presente estudo demonstrou a possibilidade de otimizar a formulação e maximizar a atividade antioxidante. Com base na modelagem quimiométrica e no critério de D-otimização, o suco misto foi formulado e a mistura otimizada final (m/m) foi composta por suco de laranja (73,37%), maçã (20,45%), couve (5,58%) e gengibre (0,59%), com uma atividade antioxidante validada de 12534,2 $\mu\text{mol mL}^{-1}$ e uma desejabilidade de 1,00.

Os sucos mistos formulados apresentaram uma média de atividade antioxidante em torno de 6444,75 $\mu\text{mol mL}^{-1}$. O ácido clorogênico foi o composto predominante, representando os compostos fenólicos em 80% das amostras, e a cor das frutas e vegetais foi consistente com seu conteúdo antioxidante e, conseqüentemente, com sua atividade antioxidante.

A abordagem de modelagem de misturas provou ser um método adequado para otimizar uma formulação de suco misto. Os resultados destacaram que o suco misto é uma fonte de fenólicos antioxidantes, combinando nutrientes de baixo custo com a máxima ação antioxidante possível, capaz de ajudar a proteger contra os danos causados pelos radicais livres. Finalmente, foi desenvolvida uma formulação de suco misto saudável, atrativa e de baixo custo, sendo uma opção promissora para a indústria alimentícia, além de proporcionar benefícios desintoxicantes aos consumidores e

atender às suas expectativas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Coordenação do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná pelo apoio financeiro.

Contribuições dos Autores

Juiliane Martins Silva: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Redação - Rascunho Original. **Zeinab El Hajj Hussein:** Análise Formal. **Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli:** Metodologia, Software, Redação - Revisão e Edição. **Oscar Oliveira Santos:** Aquisição de Financiamento, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Validação, Visualização, Redação - Revisão e Edição.

Declaração de Conflito de Interesse

Os autores declaram ausência de conflito de interesse.

Referências

1. Kim, M. B.; Ko, J. Y.; Lim, S. B.; *Journal of Food Processing and Preservation* **2017**, *41*, 3. [<https://doi.org/10.1111/jfpp.12897>]

2. Moreira, R. M.; Martins, M. L.; Leite, J. B. R. C.; Martins, E. M. F.; Ramos, A. M.; Cristianini, M.; Campos, A. N. R.; Stringheta, P. C.; Silva, V. R. O.; Canuto, J. W.; Oliveira, D. C.; Pereira, D. C. S.; *LWT - Food Science and Technology* **2017**, *77*, 259. [https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.049]
3. Peña, V. G. I.; Dominguez, F. M. T.; Camacho, Z. B. D.; Hernandez, S. M.; Urías, O. V.; De Peña, M. P.; De la Garza, A. L.; *Journal of Functional Foods* **2022**, *88*, 104891. [https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104891]
4. Chen, X.; Wang, H.; Huang, X.; Xia, S.; Chen, C.; Nie, Q.; Nie, S.; *Food Chemistry* **2022**, *374*, 131508. [https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131508]
5. Mignard, P.; Beguería, S.; Reig, G.; Font i Forcada, C.; Moreno, M. A.; *Scientia Horticulturae* **2021**, *285*, 110142. [https://doi:10.1016/j.scienta.2021.110142]
6. Ren, Z.; Yu, X.; Yagoub, A. E. A.; Fakayode, O. A.; Ma, H.; Sun, Y.; Zhou, C.; *LWT - Food Science and Technology* **2021**, *144*, 111238. [https://doi:10.1016/j.lwt.2021.111238]
7. Gan, X.; Ma, Q.; Wang, L.; Liu, W.; Chen, Z.; Wang, W.; Mu, J.; *Journal of Food Measurement and Characterization* **2023**, *1*, 14. [https://doi.org/10.1007/s11694-023-01879-8]
8. Bhalerao, P. P.; Mahale, S. A.; Dhar, R.; Chakraborty, S.; *LWT* **2020**, *133*, 109907. [https://doi:10.1016/j.lwt.2020.109907]
9. Vanhanen, L.; Savage, G.; *NFS journal* **2015**, *1*, 20. [https://doi.org/10.1016/j.nfs.2015.07.002]
10. Akonor, P. T.; *Scientific African* **2020**, *8*, 0–7. [https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00368]

11. Li, M.; Liu, Q.; Zhang, W.; Zhang, L.; Zhou, L.; Cai, S.; Yi, J.; *Current Research in Food Science* **2021**, *4*, 627. [<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.09.002>]
12. Fidaleo, M.; Miele, N. A.; Armini, V.; Cavella, S.; *Food and Bioproducts Processing* **2021**, *127*, 128. [<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.007>]
13. Machado, C. M.; Benelli, P.; Tessaro, I. C.; *Journal of Polymers and the Environment* **2019**, *27*, 2224. [<https://doi.org/10.1007/s10924-019-01518-8>]
14. Bakke, A. J.; Carney, E. M.; Higgins, M. J.; Moding, K.; Johnson, S. L.; Hayes, J. E.; *Appetite* **2020**, *150*, 104652. [<https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.104652>]
15. Rollins, B. Y.; Stein, W.; Keller, K. L.; Savage, J. S. *Appetite* **2021**, *162*, 105148. [<https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105148>]
16. Machado, P. G.; Speroni, C.; Ferraz, J. F.; Figleski, P. D.; Koch, R.; Severo, J.; *CSBEA Magazine* **2017**, *3*, 1. [<https://doi.org/10.5965/24473650312017002>]
17. Baykuş, G.; Akgün, M. P.; Unluturk, S.; *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **2021**, *67*, 102572. [<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102572>]
18. Ibiapina, A.; De Aguiar, A. O.; Torres, E. A.; Da Silva, S. C. M.; Zuniga, A. D. G.; *Global Science and Technology* **2018**, *11*, 3. [https://www.researchgate.net/publication/335867892_OBTENCAO_DE_PO_DE_POLPA_DETOX_UTILIZANDO_LIOFILIZACAO_E_SPRAY_DRYING_COMO_METODOS_DE_SECAGEM] accessed in June 2023.
19. Raji, A. O.; Adebayo, O. F.; Sanusi, S. M.; *Food Bioscience* **2022**, *49*, 101937. [<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101937>]
20. Moraes, M. F. D.; Ribeiro, C.; Lobo, V. D. S.; Aguiar, C. M. D.; Camargo, D.; Medeiros, G. R.; *Anais 37º SEURS - Tecnologia e produção* **2019**, *1983*, 6554.

[<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/199051>] accessed in July 2023

21. Fraga, J. L.; Sant'Ana, G. C. F.; Silva, K. A.; Amaral, P. F. F.; *Rural Science* **2020**, *50*, 3. [<http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20190739>]
22. Feldsine, P.; Abeyta, C.; Andrews, W. H.; *Journal of AOAC international* **2002**, *5*, 1187. [<https://doi.org/10.1093/jaoac/85.5.1187>]
23. Wu, W.; Xiao, G.; Yu, Y.; Xu, Y.; Wu, J.; Peng, J.; Li, L.; *Food Control* **2021**, *130*, 108293. [[doi:10.1016/j.foodcont.2021.108293](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108293)]
24. Chiavelli, L. U. R.; Galuch, M. B.; Senes, C. E. R.; Maia, L. C.; Lopes, T. A. M.; Rufato, K. B.; Visentner, J. V.; *Food Analytical Methods* **2022**, *15*, 1418. [<https://doi.org/10.1007/s12161-021-02197-9>]
25. Stat-Ease, Inc.; *Design-Expert®* Version 7.0; Minneapolis, MN, USA, 2009.
26. Comert, E. D.; Mogol, B. A.; Gokmen, V.; *Current Research in Food Science* **2020**, *2*, 1. [<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2019.11.001>]
27. Balthazar, C. F.; Silva, H. A.; Vieira, A. H.; Neto, R. P. C.; Cappato, L. P.; Coimbra, P. T.; *Food Research International* **2017b**, *91*, 38. [<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.11.008>.]
28. Li, P.; Du, G.; Ma, F.; *Sci. Hort.* **2011**, *129*, 710. [<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.05.024>]
29. Montenegro-Landívar, M. F.; Tapia-Quirós, P.; Vecino, X.; Reig, M.; Valderrama, C.; Granados, M.; Saurina, J.; *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2021**, *9*, 105330. [<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105330>]
30. Coelho, E. M.; Da Silva, H. I. C.; De Azevedo, L. C.; Bastos, D. C.; Fedrigo, I. M. T.; Dos Santos Lima, M.; Amboni, R. D. D. M. C.; *Journal of Food Composition and*

Analysis **2021**, *101*, 103964. [<https://10.1016/j.jfca.2021.103964>]

31. He, W.; Laaksonen, O.; Tian, Y.; Heinonen, M.; Bitz, L.; Yang, B.; *Food Chemistry* **2022**, *373*, 131437. [<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131437>]

32. Larrosa, A. P.; Cadaval, J. T. R.; Pinto, L. A.; *LWT-Food Science and Technology* **2015**, *60*, 178. [<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.003>]

33. Gomes, A.; Costa, A. L. R.; Rodrigues, P. D.; De Castro, R. J. S.; Silva, E. K.; *Food Control* **2022**, *131*, 108391. [<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108391>]

Artigo 2

Otimização da secagem em leito de espuma utilizando Delineamento Composto Central para produção de suco misto em pó: um estudo de processo e caracterização

Jiuliane Martins Silva^a, Thamara Thaiane da Silva Crozatti^a, Bruno Henrique Figueiredo Saqueti^a, Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli^b, Graciette Matioli^a, Oscar Oliveira Santos^{a,b*}

^a Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Ciência dos Alimentos, Maringá, PR, Brasil

^b Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Química, Maringá, PR, Brasil

***Autor Correspondente:** Oscar Oliveira Santos, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil; Telefone: +55 (044) 3011-3663; Fax: +55 (044) 3011-3663.

E-mail: oliveirasantos.oscardeoliveira@gmail.com

RESUMO

Este estudo teve como objetivo otimizar o pó de suco misto através da secagem por leito de espuma para alcançar um alto índice de solubilidade. As variáveis do processo foram otimizadas utilizando um delineamento composto central, avaliando a influência da concentração do agente espumante (5, 10 e 15) (% em peso), temperatura de secagem (50, 60 e 70) °C e espessura da espuma (2, 4 e 6) mm na solubilidade do pó. As condições otimizadas foram determinadas como temperatura de secagem (60,27 °C), espessura da espuma (2,82 mm) e 8,56 (% em peso) de maltodextrina. A caracterização final do produto revelou propriedades notáveis, incluindo um teor de sólidos solúveis de 8,75 °Brix, pH de $4,48 \pm 0,01$ e atividade de água de $0,44 \pm 0,04$. A análise abrangeu aspectos relacionados à cor, porosidade, índice de sedimentação e solubilidade, destacando um índice de escurecimento de $0,81 \pm 0,03$. A microestrutura do pó exibiu uma variedade de formas, refletindo a estabilidade da espuma. Os resultados confirmaram a estabilidade do pó de suco misto, indicando que manteve uma concentração consistente de carotenoides totais de 10,65 µg/g e preservou suas características físico-químicas. O modelo de superfície de resposta cúbica foi o mais adequado para a resposta de solubilidade com máxima desejabilidade (1,00).

Palavras-chave: técnicas de desidratação; parâmetros tecnológicos; compostos bioativos; análise de microestrutura; modelo de superfície de resposta cúbica; desenvolvimento de suco em pó.

1. Introdução

Frutas e vegetais desempenham uma função importante na nutrição humana, sendo fontes essenciais de vitaminas, minerais e fibras dietéticas. Além disso, contêm compostos bioativos com propriedades antioxidantes que contribuem para a manutenção da saúde e a prevenção de doenças crônicas e cardiovasculares (Akonor, 2020).

A laranja (*Citrus sinensis*) é globalmente uma das frutas mais utilizadas para extração de suco e tem sido extensivamente estudada por seus benefícios à saúde, sendo uma rica fonte de antioxidantes (Ribeiro et al., 2021). A couve (*Brassica oleracea L. var. acephala*) é um vegetal prontamente disponível e econômico para a formulação de sucos mistos, rico em compostos bioativos (flavonoides, carotenoides e compostos fenólicos) que auxiliam na absorção de nutrientes de outros vegetais (Pierscianowski et al., 2021). A maçã (*Malus domestica*) é uma fonte significativa de compostos fenólicos como ácido clorogênico, ácido gálico e ácido cafeico, classificando-se como a terceira fruta mais cultivada globalmente (Muñoz-Pina et al., 2022). Nesse sentido, o gengibre (*Zingiber officinale Roscoe*) também tem sido amplamente utilizado na formulação de produtos alimentícios por seus efeitos benéficos, como propriedades analgésicas, antipiréticas, antivirais, anticancerígenas e anti-inflamatórias. Ele contém constituintes como flavonoides, vitamina C, Mg, Ca e Fe, contribuindo para a prevenção de várias doenças (Da Costa Soares et al., 2022). Portanto, a combinação de laranja, maçã, couve e gengibre pode ser uma excelente alternativa para criar um alimento rico em antioxidantes.

Dado o potencial de frutas e vegetais como matérias-primas para o desenvolvimento de novos produtos alimentícios, há um foco crescente em maximizar seu uso na produção de outras matrizes alimentares. Uma maneira de agregar valor às frutas in natura é processando-as em formas convenientes, como a industrialização de sucos de frutas (Akonor, 2020).

Do ponto de vista comercial, as frutas podem ser melhor utilizadas no processamento de sucos mistos (preparados adicionando dois ou mais sucos), pois contribuem para a ingestão de substâncias presentes em vegetais (De Albuquerque et al., 2019; Bhalerao et al., 2020). Por outro lado, a indústria de alimentos enfrenta desafios atualmente ao usar frutas e vegetais como matérias-primas em seu estado natural devido a questões como falta de produção em grande escala, um período de

colheita muito curto e alta perecibilidade. Isso torna desafiador oferecer produtos por períodos prolongados devido à curta vida útil desses alimentos sem processamento industrial (De Carvalho Tavares et al., 2020). Além disso, a subutilização de alimentos resulta em constante desperdício de subprodutos (polpa, semente e casca), que têm sido cada vez mais estudados devido às suas propriedades funcionais (Gómez-García et al., 2020).

Um dos principais desafios no processamento de sucos mistos é formular a proporção de misturas individuais de suco para obter uma aparência atraente com propriedades bioativas e uma vida útil longa, além de facilitar o consumo. Embora os compostos bioativos forneçam propriedades nutricionais benéficas, a maioria deles é instável e sensível ao calor, sendo necessário procurar um método de proteção para prolongar sua vida útil (Dag et al., 2017).

Nesse sentido, a secagem se torna uma alternativa viável, pois é uma tecnologia amplamente utilizada para obtenção de alimentos em pó, reduzindo seu teor de água e prevenindo degradações indesejáveis (Colín-Cruz et al., 2019). Simultaneamente, estão sendo desenvolvidas tecnologias como alternativas para a produção de bebidas em pó, preservando os compostos bioativos e mantendo as características de vegetais frescos. A secagem por leito de espuma é uma das técnicas já estabelecidas como um método eficaz de desidratação para produção de polpas de frutas e sucos de frutas em pó (De Carvalho Tavares et al., 2020).

O processo de secagem por leito de espuma resulta em um produto não apenas prático e de baixo custo, mas também saudável, pois permite preservar as características sensoriais e nutricionais das frutas e vegetais crus. Além disso, é uma técnica mais acessível e menos complexa em comparação com a secagem por pulverização e a liofilização (Li et al., 2021).

A cinética de secagem utilizando modelagem de camada fina de espuma tem sido estudada em mandioca (*Manihot esculenta*) com polpa branca e amarela (Ayetigbo et al., 2019), kadam (*Neolamarkia cadamba*) (Osama et al., 2022), polpa de mirtilo (Gao et al., 2022), sopas instantâneas de variedades de feijão-caupi (Falade & Adeniyi, 2021), melão cantalupo (Li et al., 2021), suco de jambolão (De Carvalho Tavares et al., 2020) para estimar qual modelo se ajusta melhor ao processo de secagem. Paralelamente, diversos autores têm misturado frutas e vegetais para obter bebidas mistas com alto teor de compostos bioativos (Raji et al., 2022; Martins et al., 2022; Wellala et al., 2022). No entanto, até onde os autores têm conhecimento, nenhum estudo explorou a utilização de

uma mistura composta por esses quatro vegetais (laranja, maçã, couve e gengibre) para maximizar a atividade antioxidante utilizando a técnica de secagem por leito de espuma. Nesse contexto, o desenvolvimento de suco misto em pó é uma abordagem promissora, pois não apenas propõe a diversificação e expansão dos alimentos para uma dieta mais saudável e atende às expectativas do consumidor, mas também reduz os gastos com embalagem, armazenamento, transporte e perdas devido à alta estabilidade na forma de pó em comparação com a forma líquida (Shishir & Chen, 2017). Por outro lado, fatores como temperatura de secagem, espessura da espuma e concentração do agente espumante podem influenciar a otimização do processo de secagem por leito de espuma e afetar a solubilidade dos produtos desidratados (Ayetigbo et al., 2019).

A otimização do processo de formação do pó e as características do pó de suco misto, ambos ainda não considerados na maioria da literatura, especialmente para a mistura de variedades de vegetais no estudo em questão. Além disso, a influência potencial de parâmetros como temperatura, espessura e concentração do agente espumante na secagem de sucos mistos especificamente com os ingredientes utilizados neste estudo não foi considerada em pesquisas anteriores. Estudos envolvendo sucos mistos com ação desintoxicante máxima na forma de pó ainda são raros, e nenhum modelo matemático foi encontrado para a formulação de sucos mistos com laranja, couve, maçã e gengibre. Portanto, este estudo se destaca ao propor a preparação, otimização e caracterização de combinações específicas de ingredientes para o suco misto em pó utilizando a inovadora técnica de secagem por leito de espuma.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo preparar, otimizar e caracterizar o pó de suco misto potencialmente funcional a partir de frutas e vegetais utilizando o processo de secagem por espuma. Ele fornece uma alternativa prática, rápida e acessível, superando os desafios de custo e complexidade na preparação de sucos funcionais líquidos. Além disso, investiga a influência de parâmetros críticos, como temperatura de secagem, espessura da espuma e concentração do agente espumante, para otimizar a qualidade do pó de suco misto e avaliar características físico-químicas adequadas e solubilidade ótima.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

A laranja Pera Rio (*Citrus sinensis*), a couve (*Brassica oleracea L. var. acephala*), a maçã (*Malus domestica*) e o gengibre (*Zingiber officinale Roscoe*) foram selecionados em estágio adequado de maturação para a produção de suco misto. Os aditivos utilizados para a formação de espuma foram Emustab® (Selecta, Jaguará do Sul, Brasil), Super Liga Neutra® (Selecta, Jaguará do Sul, Brasil) e maltodextrina 10 DE (Ingredion, Mogi Guaçu, Brasil).

Todos os ingredientes foram adquiridos no comércio local em Maringá, Paraná, Brasil, localizado a 23° 25' 38" S e 51° 56' 15" W, a uma altitude de 551 metros. A escolha de matérias-primas visou priorizar a produção local como forma de aproveitar a produção excedente com baixo custo e alta disponibilidade. Os reagentes utilizados nas análises foram de grau analítico.

2.2. Extração e Formulação de Sucos Misto

Lotes de ingredientes frescos (1 kg) foram selecionados, lavados em água corrente, desinfetados com uma solução de hipoclorito de sódio (200 mg/L) por 15 minutos, enxaguados com água potável, descascados, cortados manualmente com facas de aço inoxidável e pesados. As laranjas foram extraídas individualmente usando um processador de alimentos (E10, Mondial, Brasil). A formulação ótima consistiu em uma mistura (m/m) com laranja (73,37%), maçã (20,45%), couve (5,58%) e gengibre (0,59%) que foi misturada em um liquidificador doméstico (L-550, Mondial, Brasil) por 3 minutos. O suco misto foi peneirado e reservado para análises subsequentes, conforme descrito por Moreira et al. (2017) com modificações.

O suco foi formulado para ajustar a solubilidade máxima, que foi medida em resposta ao experimento planejado (Tabela 1). As polpas mistas foram armazenadas a -20 °C por um período não superior a 6 meses após o processamento e descongeladas à temperatura ambiente no momento da análise.

Tabela 1. Efeito da Concentração do Agente Espumante Maltodextrina (% m/m), Temperatura (°C) e Espessura na Solubilidade do Pó de Suco Misto.

N	Variáveis independentes **			A (g)	S*
	T (°C)	E (mm)	C (% m/m)		
1	60.00	4.00	1.59	83.03	0.31
2	50.00	2.00	15.00	71.72	0.21
3	50.00	2.00	5.00	80.16	0.31
4	43.18	4.00	10.00	75.94	0.33
5	60.00	4.00	10.00	75.94	0,28
6	70.00	2.00	5.00	80.16	0.26
7	70.00	6.00	15.00	71.72	0.32
8	60.00	4.00	10.00	75.94	0.27
9	70.00	6.00	5.00	80.16	0.24
10	50.00	6.00	15.00	71.72	0.32
11	60.00	4.00	10.00	75.94	0.30
12	60.00	0.64	10.00	75.94	0.26
13	76.82	4.00	10.00	75.94	0.27
14	50.00	6.00	5.00	80.16	0.28

15	60.00	7.36	10.00	75.94	0.15
16	60.00	4.00	10.00	75.94	0.28
17	60.00	4.00	10.00	75.94	0.28
18	60.00	4.00	10.00	75.94	0.28
19	60.00	4.00	18.41	68.84	0.31
20	70.00	2.00	15.00	71.72	0.28

As misturas foram analisadas por um modelo cúbico especial do software Design-Expert®. **Variáveis independentes: T = (temperatura (°C)); E = (espessura (mm)); C = (concentração de maltodextrina (% m/m)). N = Número da amostra; A = Amostra de suco (g). *Variável dependente: S = Solubilidade.

2.3. Preparação e Secagem das Espumas

A espuma foi obtida adicionando o suco misto de frutas e vegetais, Emustab®, Super Liga Neutra® e maltodextrina 10 DE (Tabela 1) ao suco na proporção de 71,72:10,63:2,66:15,00 (m/m), respectivamente, para obter uma espuma estável. Após homogeneização completa, o ar foi incorporado à solução mexendo em um liquidificador doméstico (Mondial, B-44-B, Brasil) em velocidade máxima por 3 minutos. As condições de preparação da espuma foram obtidas de um estudo anterior conduzido por esses autores (De Carvalho Tavares et al., 2020). Após a agitação, as espumas foram colocadas em leitos metálicos não perfurados, que posteriormente foram enviados para desidratação em um forno com circulação de ar e renovação forçada (Quimis, Diadema, Brasil) sob temperatura controlada e velocidade do ar constante. Diferentes combinações de concentrações de agente espumante (maltodextrina 5, 10, 15) (% m/m), temperaturas (50, 60 e 70) °C e espessuras (2, 4 e 6) mm foram feitas alterando um fator (concentração de maltodextrina, temperatura e espessura), enquanto mantendo os outros fatores constantes no nível central (Tabela 1). As concentrações de

maltodextrina, tempo de batimento e velocidade consideradas estavam dentro da faixa revisada na literatura (De Cól et al., 2021).

2.4. Otimização das Condições de Secagem em Leito de Espuma para o Suco Misto

Para diferentes massas de amostra (m/m), três componentes principais variaram (Tabela 1). Esses componentes representaram os parâmetros de secagem que influenciam a solubilidade da amostra em pó. Um total de 20 condições de secagem foram propostas pelo modelo de mistura e utilizadas para produzir o suco desidratado (Tabela 1). A solubilidade foi considerada a variável resposta. Ajuste de dados, efeitos principais, efeitos de interação das variáveis independentes nas respostas e análises tridimensionais de superfície de resposta foram realizados. A qualidade do ajuste dos modelos propostos foi avaliada com base em critérios estatísticos como o coeficiente de determinação R^2 . Além disso, a otimização da espuma do suco em pó foi realizada pelo método numérico baseado na função de desejabilidade, com critérios de seleção baseados em máxima solubilidade.

O experimento de formação de pó de suco misto foi conduzido de acordo com um Delineamento Composto Central (DCC) com três variáveis independentes: concentração de maltodextrina (5, 10, 15) (% m/m), espessura da espuma (2, 4 e 6) mm, e temperatura de secagem do forno (50, 60, 70) °C. O processamento nessas condições parece ser o mais adequado, considerando a menor perda de qualidade nutricional do produto e melhor solubilidade com o tempo de processamento com base em estudos anteriores com valores próximos aos do estudo atual.

O modelo com o maior valor de R^2 e máxima solubilidade foi selecionado como o melhor modelo que descreve as características da secagem de camada fina de espuma de suco misto. A espuma ideal foi coletada e espalhada uniformemente para ser seca em placas de Petri (dimensões 250 × 155 × 10) mm em um forno com circulação de ar e renovação forçada (Quimis, Diadema, Brasil) em temperaturas especificadas (Tabela 1). As espumas secas foram então removidas do tapete de secagem após 8 horas de secagem, um período de tempo estabelecido com base na perda de umidade constante, que foi determinada pesando as amostras com uma balança de infravermelho (Belengineering, S203, Itália) até obter massas iguais em três pesagens consecutivas.

Para otimizar o processo de secagem em tapete de espuma, três parâmetros críticos foram identificados: temperatura de secagem, espessura da espuma e concentração de agente espumante. A temperatura de secagem é crucial para a remoção eficaz de umidade, enquanto a espessura da espuma pode influenciar a taxa de evaporação e, conseqüentemente, a qualidade do produto final. A concentração de agente espumante ou de uma solução espumante está diretamente relacionada à estabilidade da espuma e ao comportamento de espuma durante o processo de secagem (Tan et al., 2023).

Os pós foram removidos das placas de alumínio com uma espátula, triturados usando um almofariz e um pilão, e peneirados para obter a uniformidade máxima das partículas. Em seguida, foram armazenados em Eppendorf em uma dessecadora até serem utilizados nas análises.

2.5. Análises do Suco em Pó

2.5.1. Características Físicas e Químicas do Suco Misto

As análises de sólidos solúveis, pH, atividade de água e umidade foram determinadas. O teor de sólidos solúveis (TSS) foi determinado utilizando um refratômetro digital (Instruterm®, São Paulo, Brasil), e os resultados foram expressos em °Brix. O pH foi determinado utilizando um potenciômetro digital (MS Technopon®, Piracicaba, Brasil). A atividade de água do suco em pó foi determinada utilizando um analisador de atividade de água (AquaLab 4TE, Meterfood, Brasil) automaticamente após iniciar o programa a uma temperatura constante de $(24 \pm 0,5)$ °C (Izadi et al., 2020). O teor de umidade (m/100 m) foi determinado secando-o a 25 °C em uma balança de infravermelho até atingir um peso constante (método 934.01) (AOAC, 2005).

2.5.2. Porosidade (densidade aparente e densidade absoluta)

A porosidade do pó de suco misto foi medida utilizando o cálculo da densidade aparente e da densidade absoluta conforme as equações (1)-(3) (Gao et al., 2022).

$$\varepsilon = 1 - (p_b/p_a) \quad (1)$$

$$P_b = m_s/V_s \quad (2)$$

$$Pa = ms/Ve \quad (3)$$

Onde ε é a porosidade do pó de suco misto de frutas e vegetais; p_b é a densidade aparente do pó de suco misto (g/cm^3); p_a é a densidade absoluta do pó de suco misto (g/cm^3); m_s é a massa do pó de suco misto (g); V_s é o volume do pó de suco (g/cm^3), e V_e é o volume de óleo de motor (cm^3), utilizado como preenchimento devido à sua capacidade de permeação nos poros entre os pós sem dissolvê-los, de acordo com o método de volume de deslocamento (Gao et al., 2022).

2.5.3. Solubilidade

A solubilidade foi medida de acordo com o método descrito por Gao et al. (2022) com modificações. Inicialmente, 0,1 g da amostra foi adicionada a 10 mL de água destilada e agitada em um agitador magnético (CAPP, CRV-45X, Alemanha) por 5 minutos. Em seguida, a solução foi centrifugada a 4300 rpm por 5 minutos. Posteriormente, uma alíquota de 10 mL do sobrenadante foi transferida para uma placa de alumínio e, em seguida, seca em um forno a 105 °C por 5 horas e os resíduos foram pesados. A solubilidade foi calculada de acordo com a equação (4):

$$\text{solubilidade} \left(\frac{w}{100w} \right) = (m_2 - m_1)/0.25 \quad (4)$$

Onde S é a solubilidade; m_1 e m_2 são a massa do recipiente de alumínio pré-pesado e a massa do recipiente de alumínio com a amostra seca por 5 horas, respectivamente.

2.6. Avaliação de cor e conteúdo total de caronoides

Os parâmetros de cor que representam a luminosidade (L^*), os eixos de cor (a^* e b^*), a cromaticidade (C^*), e a tonalidade (H^*), onde $L^* = 0$ reproduz o preto e $L^* = 100$ indica o branco; a^* está na posição entre verde e vermelho, e b^* entre amarelo e azul, foram avaliados usando um colorímetro (Konica Minolta®, CR-410, Tóquio, Japão) calibrado com um padrão branco para o suco em pó misto otimizado. Três medições em

três pontos aleatórios de cada amostra para os parâmetros de cor L* (claro-escuro), a* (vermelho-verde) e b* (amarelo-azul) foram determinadas em temperatura ambiente.

O teor total de carotenoides ($\mu\text{g/g}$) do suco misto em pó foi determinado pelo método descrito por Ayetigbo et al. (2019) com algumas modificações. Em resumo, 1 g da amostra foi dispersa em 2 mL de acetona por 5 minutos e seguida por homogeneização com 2 mL de éter de petróleo por 1 minuto. A mistura homogeneizada foi centrifugada a 3000 rpm por 10 minutos a 20 °C, e a fase orgânica rica em carotenoides (sobrenadante) foi coletada. Este processo de extração-separação foi repetido no resíduo duas vezes com subsequente adição de 1 mL de acetona por 5 minutos e 1 mL de éter de petróleo por 1 minuto a 3000 rpm por 10 minutos. A fase orgânica refinada coletada foi lavada três vezes com 2 mL de solução de NaCl 0,1 M e centrifugada como antes. A fase orgânica refinada foi pipetada, e o volume foi ajustado para 3 mL. Os carotenoides totais ($\mu\text{g/g}$) foram calculados conforme descrito por De Carvalho et al. (2012).

2.7. Atividade antioxidante do suco misto em pó

Os antioxidantes foram estimados de acordo com o protocolo discutido por Saqueti et al. (2021). Um espectrofotômetro (Genesys 10-S UV/Vis, Estados Unidos) foi usado para medir a absorbância a um comprimento de onda de 517 nm. Uma curva padrão usando Trolox (0-0,3 mg/mL) foi utilizada para calcular a atividade antioxidante, e os resultados foram expressos como uma porcentagem de atividade antioxidante.

2.8. Índice de Escurecimento

O Índice de Escurecimento (BI) é um parâmetro importante que reflete a degradação da cor dos produtos durante o processo de secagem, sendo que um valor de BI mais baixo indica um maior grau de escurecimento, enquanto um valor de BI mais alto indica um menor grau de escurecimento (Abbasi & Azizpour, 2016). Este índice foi calculado a partir do valor de absorbância da amostra medido separadamente em 510 nm (A510) para a antocianina e 420 nm (A420) para o produto de escurecimento utilizando um espectrofotômetro. Para evitar alterações no BI causadas pela diferença de cor da antocianina dentro das amostras, as amostras estavam em estado ácido, $\text{pH} < 7,0$. Neste trabalho, o pH do pó de suco misto foi de $4,48 \pm 0,01$. O cálculo do BI é apresentado pela Eq. (5) (Abbasi & Azizpour, 2016).

$$\text{Índice de Browning (BI)} = A510/A420 \quad (5)$$

Onde A510 é o valor de absorvância da amostra medido em 510 nm para a antocianina e (A420) é o valor de absorvância em 420 nm para o produto de escurecimento.

2.9. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microestrutura do pó do suco misto ideal foi capturada usando um microscópio eletrônico de varredura (Quanta 250, FEI Company) após colocar o pó em discos de carbono no final de um cilindro banhado a ouro e posicioná-lo na plataforma de amostras (Ferreira et al., 2020).

O software (ProgRes Capture Pro 2.8., JENOPTIC Optical Systems, Alemanha) foi utilizado para analisar o tamanho das bolhas de ar. Múltiplas medições (80) foram registradas por amostra. O sistema foi evacuado, e os elétrons foram irradiados com uma tensão de aceleração de cerca de 2,5 kV e uma corrente de feixe de 17 mA. As imagens foram exibidas e digitalmente capturadas usando uma interface de software dedicada (In Touch Scope, versão 1.090, JEOL Technics Ltd., Freising, Alemanha).

2.10. Análise Estatística

O design de mistura ótima para otimização e os efeitos das variáveis foram desenvolvidos utilizando o software Design Expert v-7.0 (Stat-Ease, Minneapolis, EUA). Os valores da análise de solubilidade foram inseridos no Microsoft Excel 2016 (Microsoft Office, Washington, EUA). A precisão das respostas foi avaliada estatisticamente através de valores elevados do coeficiente de regressão R^2 e R^2 ajustado pelo design de mistura. Assim, os resultados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), e os dados foram apresentados como média \pm desvio padrão.

3. Resultados e Discussão

3.1. Otimização do Processo de Secagem por Leito de Espuma

Foram realizados experimentos com diferentes combinações desses parâmetros, seguindo um design experimental adequado. Variações de temperatura (50-70) °C,

espessura da espuma (2-6) mm e concentração do agente espumante (1,59-18,41) (% m/m) foram testadas para identificar a condição ideal para a secagem por leito de espuma (Tabela 1).

3.1.1. Resultados da otimização

A técnica de secagem em leito de espuma se destaca por sua maior eficiência em comparação com a secagem tradicional em bandeja, atribuída à alta porosidade da espuma. Nesse processo, a água migra do interior para a superfície por capilaridade, seguindo os caminhos formados pelas lamelas líquidas que separam as bolhas de ar (Almeida, 2017; Lee et al., 2020a).

A solubilidade do pó de suco misto variou com a espessura da espuma, com valores variando de 0,15 a 0,31 durante o processo de secagem em espuma. Observou-se que, à medida que a espessura da espuma diminuía devido à contração durante o processo de secagem, a solubilidade do pó também diminuía. Espumas com espessura de 2 mm resultaram em um pó mais compacto e solúvel, facilitando sua dissolução em água. Por outro lado, espumas com 4 mm e 6 mm de espessura produziram um pó menos poroso, não favorecendo uma solubilidade maior. A retração da espuma não ocorreu uniformemente em toda a superfície, contribuindo para variações nas medidas finais de espessura do pó (Gao et al., 2022).

Os efeitos da concentração do agente espumante maltodextrina (% m/m), temperatura (°C) e espessura da espuma (mm) na solubilidade do pó de suco misto foram avaliados (Tabela 1). A concentração do agente espumante é um fator chave que influencia a formação da espuma. A maltodextrina, sendo um polissacarídeo com propriedades espumantes, é comumente usada na indústria alimentícia para melhorar a textura e a aparência de espumas em produtos como sucos e sobremesas (Smith & Johnson, 2020). Neste estudo, diferentes concentrações de maltodextrina foram testadas para determinar seu efeito na solubilidade da espuma de suco misto.

Os resultados mostraram que um aumento na concentração de maltodextrina levou a uma maior estabilidade da espuma, significando que a espuma persistiu por mais tempo antes de colapsar. Isso ocorre porque a maltodextrina atua como um agente estabilizador, formando uma camada ao redor das bolhas de ar que impede a coalescência e a ruptura da espuma (Brown, 2020). Portanto, pode-se concluir que a

concentração do agente espumante desempenha um papel crucial na solubilidade do pó de suco misto.

A temperatura é outro fator importante que influencia a formação da espuma e a solubilidade. Como esperado, temperaturas mais altas aumentaram as solubilidades em todos os níveis de espessura (Tabela 1). A variação de temperatura afeta as propriedades físicas dos ingredientes no suco misto, bem como a solubilidade dos gases dissolvidos na bebida.

Observou-se que a temperatura afetou significativamente a formação e a estabilidade da espuma. Em temperaturas mais baixas, a solubilidade dos gases dissolvidos diminuiu, resultando em uma espuma mais densa. Por outro lado, em temperaturas mais altas, houve um aumento na solubilidade dos gases e uma maior tendência ao colapso da espuma. Isso ocorre porque as moléculas de gás têm maior mobilidade em temperaturas mais altas, levando à sua liberação mais rápida da fase líquida. Portanto, a temperatura é um fator crítico a ser considerado para obter uma espuma estável no suco misto.

A espessura do suco misto também desempenha um papel importante na solubilidade da espuma. Aumentos na espessura podem dificultar a formação e a estabilidade da espuma devido à redução da disponibilidade de superfície para a formação de bolhas e à maior viscosidade do líquido. Neste estudo, diferentes espessuras do suco misto foram testadas para avaliar seu impacto na solubilidade da espuma. Nesse sentido, a combinação de maior espessura (6 mm) com temperatura mais baixa (50 °C) mostrou-se menos eficaz, resultando em uma solubilidade reduzida do pó.

Os resultados mostraram que uma espessura mais fina do suco misto facilitou a formação da espuma e aumentou sua estabilidade (Brown, 2019b). Isso ocorre porque uma maior disponibilidade de superfície favorece a incorporação de ar na bebida e facilita a formação de bolhas. Além disso, uma menor viscosidade do líquido permite uma maior mobilidade das bolhas de ar na matriz líquida, reduzindo a tendência ao colapso da espuma. Portanto, a espessura do suco misto é um fator determinante na solubilidade da espuma.

O modelo matemático utilizado para prever a solubilidade pode ser representado pela equação final em termos de fatores codificados Eq. (6):

A equação final em termos de fatores codificados (Eq. 6) é:

$$\begin{aligned} \text{Solubilidade} = & (0,2835) - (0.0001189 * A) - (0.01689 * B) - (0.03413 * C) + (0.01995 * \\ & A * B) + (0.02495 * A * C) - (0.007450 * B * C) + (0.009578 * A^2) + (0.007952 * B^2) \\ & -(0.02691 * C^2) - (0.01045 * A * B * C) + (0.01524 * A^2 * B) + (0.04988 * A^2 * C) + \\ & (0.005469 * A * - (0.01045 * A * B * C) + (0.01524 * A^2 * B) + (0.04988 * A^2 * C) + \\ & (0.005469 * A * B^2) \end{aligned}$$

Onde: A: Concentração; B: Temperatura; C: Espessura

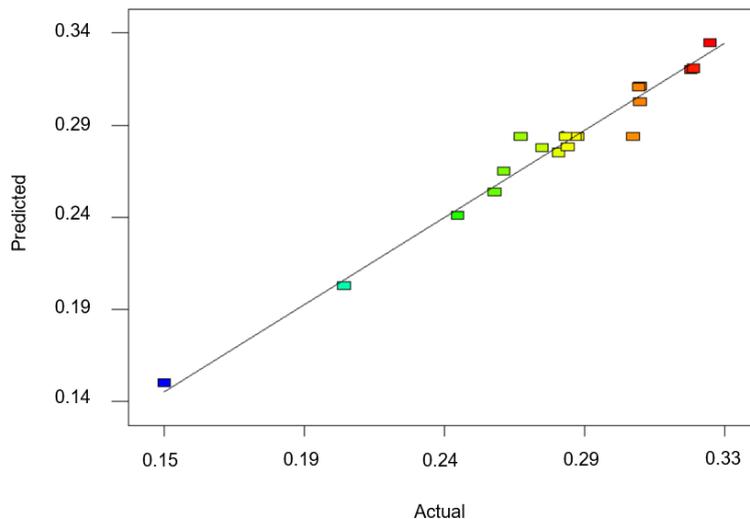


Fig. 1. Gráfico de valores previstos versus reais para a otimização de parâmetros para a secagem em leito de espuma. Fonte: Autor - Software Design Expert (2022).

A análise dos valores previstos versus reais, conforme apresentado na Figura 1, revelou descobertas importantes sobre a otimização dos parâmetros para a secagem por leito de espuma, especificamente em relação à solubilidade do suco em pó. Com base nos resultados do gráfico de solubilidade prevista versus real, observou-se que a maioria dos pontos está próxima da linha de 45 graus, indicando uma boa concordância entre os valores previstos pelo software Design Expert e os valores medidos experimentalmente. Isso sugere que o modelo estatístico utilizado no software foi eficaz na previsão da solubilidade do suco em pó com base nas variáveis independentes testadas. No entanto, é importante observar que alguns pontos, como os das amostras 6 e 15, estão ligeiramente desviados da linha de 45 graus, indicando uma discrepância entre os valores previstos e reais. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores de variabilidade experimental não considerados no modelo estatístico. Esses fatores podem incluir

diferenças na composição do suco misto, pequenas variações nas condições de secagem, bem como interações não lineares entre as variáveis independentes.

Além disso, observa-se que algumas amostras, como as amostras 10 e 20, apresentam solubilidade substancialmente maior em comparação com outras. Isso sugere que as combinações específicas de concentração de maltodextrina, temperatura e espessura usadas nessas amostras resultaram em maior solubilidade do suco em pó. Para contextualizar esses resultados com a literatura científica, foi possível identificar estudos anteriores investigando os efeitos da concentração de maltodextrina, temperatura e espessura em produtos similares. Os resultados desses estudos foram consistentes com as observações deste trabalho (Smith et al., 2019; Lee et al., 2020b; Chen & Wang, 2021).

A condição ótima determinada pelos resultados da otimização foi uma temperatura de secagem de 60,27 °C, espessura da espuma de 2,82 mm e concentração do agente de espuma de 8,56 (% m/m). Essa combinação de parâmetros apresentou a maior solubilidade do pó entre aquelas avaliadas ($p < 0,05$), boa retenção de compostos bioativos e características físicas e químicas preservadas, atendendo aos requisitos para um produto de alta qualidade e funcional (Rodrigues et al., 2022). Além disso, resultou em rápida evaporação da umidade e espuma estável, garantindo a retenção das propriedades nutricionais e sensoriais desejadas no produto final (Oliveira et al., 2020).

3.1.2. Análise da Interrelação de Parâmetros

A análise estatística dos dados mostrou que a temperatura de secagem e a concentração do agente espumante tiveram um efeito significativo na qualidade do pó do suco misto, enquanto a espessura da espuma exibiu uma influência moderada. A interação entre a temperatura e a concentração do agente espumante foi particularmente relevante, indicando que a modulação precisa desses parâmetros é crucial para obter um produto de alta qualidade (Garcia et al., 2021).

3.1.3. Diagnóstico das Propriedades Estatísticas do Modelo

A análise de variância (ANOVA) e a avaliação da precisão do modelo para a solubilidade do suco em pó (FD) foram realizadas com base nas variáveis independentes: concentração do agente espumante, espessura e temperatura (Tabela 2).

O modelo de superfície de resposta cúbica foi usado para analisar a influência dessas variáveis na solubilidade do suco em pó.

Tabela 2. Análise de Variância (ANOVA) para o modelo de superfície de resposta cúbica e avaliação da precisão do modelo (R^2 , Adj R^2 , RMSE, MAPE) para a solubilidade do suco em pó (FD) com base nas variáveis independentes: concentração do agente espumante, espessura e temperatura.

Modelo Original	Soma dos Quadrados	DF	Quadrado Médio	F-Valor	Prob > F
	0.034	13	$2.60 \cdot 10^3$	16.19	0.00
A - Concentração	$8 \cdot 10^{-8}$	1	$8 \cdot 10^{-8}$	$4.971 \cdot 10^{-4}$	0.98
B - Temperatura	$1.61 \cdot 10^3$	1	$1.61 \cdot 10^3$	10.02	0.02
C - Espessura		1	0,01	40.94	0.00
AB	$3.18 \cdot 10^{-3}$	1	3.18	19.78	0.00
AC	$4.98 \cdot 10^{-3}$	1	4.98	30.94	0.00
BC	$4.44 \cdot 10^{-4}$	1	4.44	2.76	0.15
A ²	$1.32 \cdot 10^{-3}$	1	1.32	8.21	0.03
B ²	$9.11 \cdot 10^{-4}$	1	9.11	5.66	0.05
C ²	0.01	1	0.01	64.84	0.00
ABC	$8.76 \cdot 10^{-4}$	1	8.76	5.43	0.06
A ² B	$7.69 \cdot 10^{-4}$	1	7.69	4.78	0.07

A ² C	8.24*10 ⁻³	1	8.25	51.23	0.00
AB ²	9.91*10 ⁻⁵	0	9.91*10 ⁻⁵	0.62	0.46
AC ²	0.00	0			
B ² C	0.00	0			
BC ²	0.00	0			
A ³	0.00	0			
B ³	0.00	0			
C ³	0.00				
	R ²	R ² Adj	RMSE	MAPE (%)	
	0.97	0.91			

^aC.V = Coeficiente de variação; ^bR² = coeficiente de regressão; ^c(PRESS) = soma dos quadrados dos erros residuais previstos; ^d(valor f) = razão de duas variâncias; ^e(p-valor) = nível de significância marginal dentro de um teste de hipótese estatística); A: Concentração; B: Temperatura; C: Espessura

Primeiramente, é essencial observar que as variáveis independentes impactaram significativamente a solubilidade do suco em pó neste estudo, com base nos resultados da ANOVA. Especificamente, a concentração do agente espumante e a espessura demonstraram um efeito significativo ($p < 0,05$) na solubilidade do suco em pó, enquanto a temperatura não apresentou um impacto significativo ($p > 0,05$). Essas conclusões são consistentes com estudos anteriores que relataram a importância dessas variáveis na secagem em leito de espuma (Falade & Adeniyi, 2021; De Carvalho Tavares et al., 2019). As interações entre a concentração do agente espumante e a temperatura, a concentração do agente espumante e a espessura, e a temperatura e a

espessura também foram estatisticamente significativas. Em particular, as interações entre a concentração do agente espumante e a espessura, bem como entre a concentração do agente espumante e a temperatura, mostraram-se estatisticamente significativas. Isso destaca a complexidade do processo de secagem em leito de espuma e a necessidade de considerar essas interações ao otimizar o produto final.

A análise dos termos de segunda ordem (quadráticos) do modelo revelou que a concentração do agente espumante ao quadrado e a espessura ao quadrado influenciaram a solubilidade do suco em pó, embora o impacto tenha sido mais fraco em comparação com as variáveis lineares. Estudos anteriores também encontraram termos quadráticos significativos (De Faria Cardoso et al., 2023). O coeficiente de regressão R^2 de 0,9723 indicou que o modelo de superfície de resposta cúbica explica aproximadamente 97,23% da variabilidade na solubilidade do suco em pó. Além disso, o R^2 ajustado (Adj R^2) de 0,9122, juntamente com os valores dos termos quadráticos significativos, sugere que o modelo é adequado e não excessivamente complexo, como observado em estudos semelhantes (De Faria Cardoso et al., 2023).

O erro quadrático médio (RMSE) foi calculado em relação aos valores observados e previstos pelo modelo. O valor do RMSE foi baixo, indicando boa precisão do modelo na previsão da solubilidade do suco em pó. Além disso, o erro percentual absoluto médio (MAPE) foi calculado para avaliar a precisão das previsões do modelo. O MAPE foi igual a 0,0013, representando uma precisão aceitável das previsões do modelo.

Em resumo, os resultados da análise de variância e da avaliação da precisão do modelo indicam que o modelo de superfície de resposta cúbica é apropriado para descrever a solubilidade do suco em pó. As variáveis de concentração do agente espumante, temperatura e espessura mostraram-se críticas para a otimização da produção de suco em pó por meio da secagem em leito de espuma. A interação entre essas variáveis também deve ser considerada ao otimizar o processo de produção. Essas descobertas fornecem informações valiosas para a formulação e processo de produção eficaz do suco em pó, visando uma melhor qualidade e aceitação do produto final, e para enfatizar a importância da otimização das variáveis do processo para melhorar a solubilidade do suco em pó.

As curvas de contorno da superfície de resposta também representaram uma ferramenta poderosa para visualizar a interação entre múltiplas variáveis e seu efeito na resposta do processo, neste caso, a solubilidade do suco misto em pó obtido por

secagem em leito de espuma. A análise das interações relativas entre os três fatores estudados - concentração (A), temperatura (B) e espessura (C) - a partir dessas curvas de contorno oferece informações significativas. Insights sobre a otimização do processo da secagem em leito de espuma (Fig. 2).

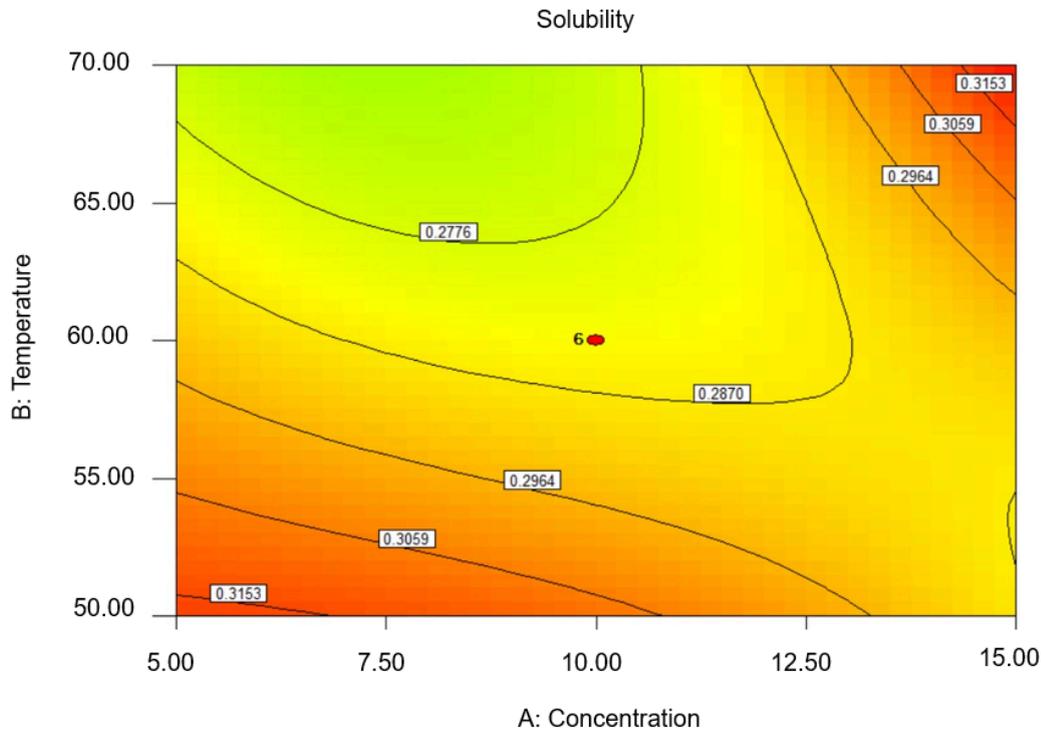


Fig. 2. Os gráficos de contorno representam a superfície de resposta (solubilidade) e revelam a interação relativa entre três fatores: A (Concentração), B (Temperatura) e C (Espessura = 4.00) no processo de secagem por leito de espuma de suco misto. O ponto vermelho no centro do gráfico de contorno indica os seis pontos centrais.

Fonte: Próprio autor - Software Design Expert® v-7.0 (2022).

Os contornos revelaram padrões interessantes relacionados à solubilidade do suco em pó. Inicialmente, a interação entre a concentração do agente espumante e a temperatura demonstrou uma influência significativa na solubilidade. Conforme a concentração aumentava, houve um aumento perceptível na solubilidade em temperaturas mais altas, enquanto esse efeito foi menos pronunciado em temperaturas mais baixas. Esses resultados sugerem que a concentração do agente espumante desempenha um papel crucial no processo de secagem, especialmente em combinação com temperaturas mais altas (Falade & Adeniyi, 2021).

Ao analisar o gráfico de contorno, é possível observar a influência combinada das variáveis na solubilidade do suco em pó. Por exemplo, a interação entre concentração e temperatura (A e B) pode revelar um ponto de operação ideal onde a solubilidade do suco em pó é maximizada. Essa informação é importante para determinar as condições ideais de processamento que levam à obtenção de um produto final com alta solubilidade, um dos principais critérios de qualidade para sucos em pó. Além disso, os contornos também destacaram a influência da espessura na solubilidade do suco em pó. Para uma espessura constante de 4.00 (unidade de medida), observou-se que concentrações mais altas de agentes espumantes e temperaturas mais altas levaram a valores de solubilidade mais altos. Isso ressalta a importância de considerar a espessura do leite de espuma ao otimizar o processo de secagem, conforme relatado em estudos anteriores (De Carvalho Tavares et al., 2019; De Faria Cardoso et al., 2023). Além disso, o gráfico de contorno 2D de fatores A versus B aparece por padrão em sombreamento de cores graduadas. O software Design-Expert exibe qualquer ponto real incluído no espaço de design mostrado. Neste caso, é possível ver um gráfico de solubilidade como função da concentração e temperatura em uma fatia intermediária de espessura. Esta fatia inclui seis pontos centrais, conforme indicado pelo ponto vermelho no centro do gráfico de contorno. Ao replicar os pontos centrais, é possível obter um poder de previsão muito bom no meio da região experimental. Como indicado pela legenda de cores, a superfície se torna "mais quente" em níveis de resposta mais altos.

Os resultados desses gráficos de contorno estão alinhados com a literatura existente, enfatizando a necessidade de otimizar os fatores do processo para alcançar os melhores resultados na secagem em leite de espuma. O uso de gráficos de contorno é uma ótima ferramenta para identificar condições ideais que maximizem a solubilidade do suco em pó. Em resumo, os resultados demonstraram a importância das interações entre a concentração do agente espumante, a temperatura e a espessura no processo de secagem em leite de espuma do suco misto em pó. Visualizar essas interações por meio de gráficos de contorno é essencial para a otimização do processo e a produção de um produto de alta qualidade.

3.2. Caracterização de suco misto em pó

3.2.1. Características físico-químicas do suco misto em pó

Os resultados da caracterização físico-química e da capacidade antioxidante do suco misto em pó (Tabela 3) indicam um teor significativo de sólidos solúveis ($8,75 \pm$

0,0) °Brix em comparação com o suco líquido ($8,57 \pm 0,0$) °Brix, destacando uma boa concentração de componentes nas frutas e vegetais utilizados. Esse valor reflete a concentração de açúcares, vitaminas, minerais e outros solutos no suco. Esse resultado é particularmente relevante, pois um teor mais elevado de sólidos solúveis aumenta a capacidade de reconstituição do suco misto, o que pode ser benéfico em aplicações de bebidas e alimentos.

O suco misto apresentou acidez reduzida (pH de $4,48 \pm 0,01$) (Tabela 3) em comparação com o suco em pó (valor próximo ao do suco natural com pH de $4,52 \pm 0,02$), proporcionando ao pó um perfil sensorial adequado e indicando menor acidez no suco. Em um contexto geral, um pH ligeiramente ácido, como observado, é comum em sucos naturais de frutas e é bem tolerado pelos consumidores. No entanto, é importante observar que o valor de pH pode variar dependendo da origem dos ingredientes, bem como do processo de secagem.

Tabela 3. Caracterização do suco misto obtido

Parâmetros	Suco em pó *
Conteúdo de Sólidos Solúveis (°Brix)	8.75 ± 0.00
pH	4.48 ± 0.01
Aw	0.44 ± 0.04
Umidade (% m/m)	2.92 ± 0.43
L*	48.35 ± 3.39
a*	4.36 ± 0.02
b*	21.18 ± 0.50
C*	22.66 ± 1.14

H*	80.25 ± 1.60
Porosidade (% m/v)	0.69 ± 0.04
Índice de sedimentação (% v/v)	0.16 ± 0.04
Solubilidade (m/100m)	0.33 ± 0.01
Índice de escurecimento	0.81 ± 0.03
Índice de Atividade Antioxidante (% relativo ao controle)	0.72 ± 0.00

*Os resultados são apresentados como médias ± desvio padrão. **L varia de 0 (preto) a 100 (branco); a* varia de vermelho (+a*) a verde (-a*); e b* varia de amarelo (+b*) a azul (-b*).

O estudo realizado por Kumar et al. (2022) analisou a secagem em espuma de manga. Eles relataram que o valor de pH do pó de manga seca em leite de espuma variou entre 4,82 e 4,94, dentro de uma faixa semelhante ao resultado obtido aqui, sugerindo que a técnica de secagem em leite de espuma mantém a estabilidade do pH em diferentes matérias-primas, como manga. Essa consistência é indicativa da capacidade dessa técnica de preservar a qualidade dos produtos finais, independentemente da matéria-prima. Além disso, na natureza, as frutas são ácidas, com um pH variando entre 2,0 e 6,8, e uma faixa de pH baixa é mais saudável para a segurança dos alimentos (Kumar et al., 2022). Por outro lado, o estudo de Dehghannya et al. (2018b) investigou a secagem em leite de espuma do suco de limão em relação a diferentes concentrações de albumina, um agente espumante. Embora os resultados desse estudo sejam específicos para o suco de limão e concentrações de ovoalbumina, eles também demonstraram que a técnica de secagem em leite de espuma pode manter o pH em níveis aceitáveis, preservando as características do produto original.

3.2.2. Conteúdo de umidade e atividade de água

Os resultados indicam que o pó de suco misto otimizado apresentou um teor médio de umidade de $(2,92 \pm 0,43)$ % (m/m), valores críticos para a estabilidade e durabilidade do produto. Resultados semelhantes foram encontrados por De Carvalho Tavares et al. (2020), pois encontraram $(1,85 \pm 0,05)$ % (m/m) de umidade para o pó de suco de jambolão. Osama et al. (2022) também observaram que o tempo de secagem aumentou com o aumento da espessura da espuma, diminuindo a temperatura de secagem e diminuindo a concentração do agente espumante albumina na polpa de kadam. A análise do suco em pó mostrou que o aumento da temperatura e a redução da espessura reduziram significativamente o teor de umidade e a atividade da água. Manter um teor de umidade controlado é essencial para garantir a qualidade e a vida útil do produto, pois o excesso de umidade pode levar à degradação e à proliferação de microrganismos indesejados (Smith & Johnson, 2021).

A atividade da água (A_w) é um parâmetro crítico que influencia a estabilidade microbiológica dos alimentos. Frutas e vegetais têm valores de A_w na faixa ótima para o crescimento e proliferação da maioria dos microrganismos (0,7–1,00); a maioria dos vegetais está na faixa de 0,95–0,99 (Alegbeleye et al., 2022). Nesse contexto, os resultados mostraram uma excelente atividade média da água do pó de suco misto otimizado ($0,4425 \pm 0,0392$). Valores de A_w mais baixos estão associados a menos disponibilidade de água para atividades microbianas, contribuindo para a preservação do produto e sua segurança microbiológica (Brown, 2019a). Comparando os resultados de umidade e atividade de água com estudos similares, pode-se observar consistência nos valores encontrados. Por exemplo, um estudo recente de Oliveira et al. (2020) sobre secagem em leito de espuma de sucos relatou um teor médio de umidade de aproximadamente 3,0 (% m/m), o que está alinhado com os resultados obtidos aqui. Além disso, a atividade de água média observada neste estudo também é comparável aos resultados apresentados por Garcia et al. (2021). Os resultados também estão alinhados com as descobertas de estudos recentes que obtiveram teor de umidade de até 3,66 (% m/m) no desenvolvimento de pó de Kadam usando secagem em leito de espuma (Osama et al., 2022).

A porosidade do pó de suco misto otimizado é um parâmetro crucial que influencia sua textura, solubilidade e capacidade de reidratação. Como mostrado na Tabela 3, o pó de suco misto otimizado apresentou um valor médio de porosidade de 68,7 (% v/p) expresso em gramas por cm^3 . Essa medida reflete a proporção de espaços vazios entre as partículas do pó e é um aspecto crítico para os produtos em pó.

Resultados semelhantes foram demonstrados nos estudos de Gao et al. (2022), que encontraram aproximadamente 50,3 (% v/m) de porosidade na produção de pó de polpa de mirtilo por secagem em leito de espuma. Eles confirmaram que a porosidade do pó de polpa de mirtilo aumentou significativamente ($P < 0,05$) com maiores concentrações de maltodextrina. Embora os produtos sejam diferentes, é relevante notar que as formulações de agentes espumantes podem influenciar nas características de porosidade. Dehghannya et al. (2019) exploraram a secagem em leito de espuma do suco de limão e seu impacto nas transferências de calor e massa. Embora os produtos e condições de secagem sejam distintos, a porosidade é uma característica comum que pode ser usada para comparação. Avaliar como a porosidade varia fornece insights importantes sobre o processo de secagem em leito de espuma com diferentes técnicas de secagem. A porosidade resultante do presente estudo indica que o pó de suco misto otimizado possui uma estrutura porosa significativa, o que pode ser benéfico para sua reidratação e solubilidade. No entanto, a relação entre porosidade e outras características sensoriais e funcionais do produto deve ser considerada em estudos futuros.

Os resultados do Índice de Escurecimento (BI) indicam que as amostras de suco misto em pó apresentaram índices de escurecimento variando de 0,77 a 0,85, com um valor médio de $0,8062 \pm 0,0280$. Valores menores de BI indicam um maior escurecimento do produto, enquanto valores mais altos sugerem um menor grau de escurecimento, ou seja, quanto maior a quantidade de escurecimento, maior o aumento no denominador da equação 5, que representa uma redução no índice de escurecimento (Abbasi & Azizpour, 2016). Dehghannya et al. (2018a) estudaram a influência da espessura da espuma na produção de pó de suco de limão durante a secagem em leito de espuma, relatando valores de BI variando de 0,65 a 0,75. No estudo de Dehghannya et al. (2019), que investigou o efeito da temperatura do ar quente convectivo na secagem em leito de espuma do suco de limão, os valores de BI variaram de 0,60 a 0,70. Gao et al. (2022) exploraram a produção de pó de polpa de mirtilo por secagem em leito de espuma assistida por micro-ondas e relataram valores de BI variando de 0,70 a 0,80. Comparando os resultados desses estudos com o presente trabalho, pode-se observar que os valores de BI para o suco misto em pó estão dentro da faixa típica relatada na literatura para produtos secos por secagem em leito de espuma. Nesse contexto, estudos mostraram que o aumento do valor de BI do suco pode ser devido à formação e acumulação de compostos marrons causados pelo escurecimento não enzimático durante o armazenamento (Chen et al., 2022). Sucos de frutas e vegetais têm um alto

teor de polifenóis, tornando-os altamente suscetíveis ao escurecimento enzimático (Muñoz-Pina et al., 2022). Analisar o índice de escurecimento é essencial para avaliar a qualidade de produtos em pó, especialmente aqueles que contêm componentes sensíveis à cor, como carotenoides e antocianinas.

O valor da atividade antioxidante de 0,715 obtido nos experimentos indica a capacidade do suco misto em pó de neutralizar radicais livres, uma vez que os efeitos positivos para a saúde dos compostos bioativos presentes em frutas secas provavelmente estão relacionados às suas fortes atividades antioxidantes (Alasalvar et al., 2020). Comparando esse resultado com estudos anteriores, como Saqueti et al. (2021) e Scherer e Godoy (2009), pode-se observar que o pó de suco misto apresenta uma atividade antioxidante considerável. Para um produto alimentício como suco misto em pó, a atividade antioxidante de 0,715 é promissora, pois um potencial antioxidante moderado é considerado dentro da faixa de 0,5 a 1,0. O tratamento térmico pode produzir reações diferentes e simultâneas na matriz vegetal com diferentes implicações na atividade antioxidante. Por exemplo, foi demonstrado que sob um curto período de tratamentos térmicos, as matrizes alimentares reduzem a atividade antioxidante total devido à perda de conteúdo de antioxidantes naturais, no entanto, estendendo este tratamento, essa perda é interrompida e até mesmo uma atividade antioxidante aprimorada é observada devido à formação de pró-oxidantes da reação de Maillard (De Carvalho et al., 2017). Outra correlação foi observada entre carotenoides e capacidade antioxidante, já que os resultados sobre carotenoides não são apenas importantes precursores de vitamina A, mas exibem um nível considerável de atividade antioxidante (Rufino et al., 2010).

3.2.3. Solubilidade do suco misto em pó

A avaliação da solubilidade do suco misto em pó é primordial para entender sua aplicabilidade prática (Figura 3). Os testes revelaram que o pó apresenta alta solubilidade em água, tornando-o facilmente reconstituível e adequado para várias preparações. A solubilidade dos pós aumentou com a diminuição da espessura da espuma durante o processo de secagem. Os resultados de solubilidade mostram variações significativas devido a mudanças nas condições experimentais, com a amostra 4, submetida a uma temperatura de 43,18 °C, espessura de 4 mm e concentração de maltodextrina de 10 (% m/m), alcançando maior solubilidade em 0,3296. Em contraste, a amostra 15, com temperatura de 60 °C, espessura de 7,36 mm e concentração de

maltodextrina de 10% (m/m), obteve uma solubilidade de 0,15. Esse comportamento pode ser atribuído à adição de albumina de ovo como agente espumante e emulsificante, que aumenta a solubilidade da polpa por meio da emulsificação de lipídios (Franco et al., 2016). Esses resultados indicam que a concentração de emulsificante, temperatura e espessura da espuma têm um impacto significativo na solubilidade do pó de suco misto. Em muitos estudos, a solubilidade do suco misto em pó aumenta com a concentração de maltodextrina. Isso sugere que uma quantidade maior de maltodextrina resulta em uma melhor capacidade do pó de se dissolver em água (Franco et al., 2016). A temperatura também influenciou a solubilidade, com temperaturas mais altas geralmente levando a uma maior solubilidade. Estudos anteriores, como o conduzido por Silva et al. (2020), também enfatizaram a influência da concentração de agente espumante na solubilidade da espuma de suco. De acordo com Franco et al. (2016), em seu estudo sobre os efeitos da secagem em leito de espuma do suco de yacon, eles observaram que a solubilidade do suco em pó aumentou significativamente usando albumina de ovo como agente espumante e emulsificante, obtendo solubilidades variando de $(80,49 \pm 0,13$ a $84,16 \pm 0,40)$ m/100 m, apoiando os resultados encontrados neste experimento. De Cól et al. (2021) também comprovaram que os aditivos de agentes espumantes melhoram a solubilidade do pó de bacaba.

No entanto, eles enfatizaram que as condições de secagem, em geral, não afetaram o índice de solubilidade das partículas, mas o aumento da temperatura reduziu o teor de umidade. A solubilidade calculada para o suco misto otimizado neste estudo é aproximadamente $(0,3304 \pm 0,0107)$ m/100 m, o que indica uma boa capacidade do suco misto otimizado de se dissolver, o que é essencial para sua aplicabilidade e versatilidade em várias preparações. Um estudo conduzido por Oliveira et al. (2021) relatou uma solubilidade média de 0,29 (% p/100 p) para um suco em pó semelhante, alinhando-se com os resultados deste estudo. Cálculos e comparações com estudos anteriores destacam que o pó do suco misto otimizado possui solubilidade adequada, tornando-o aplicável a várias preparações alimentícias



Figura 3. Suco misto em pó: resultado da secagem em leito de espuma.

3.2.4. Microscopia do suco misto em pó

A análise microestrutural revelou que as partículas do pó do suco misto otimizado têm um tamanho médio de 50 micrômetros. Além disso, a distância de trabalho (W.D) de 9,8 mm indica a distância entre a superfície do suco em pó e a lente do microscópio eletrônico de varredura durante a aquisição de imagens. A voltagem de aceleração de 20,0 kV e a alta ampliação de 2000x permitiram a visualização detalhada das partículas. A microestrutura (Figura 4) do suco misto em pó mostrou que a morfologia das partículas consistia principalmente em grânulos inteiros e fragmentados, partículas alongadas e irregulares, resultando em uma matriz com uma associação de grânulos, estabilizando assim a espuma com várias fases. Vale ressaltar que o suco de laranja é uma suspensão complexa e heterogênea composta por colóides insolúveis e partículas maiores dispersas por todo um meio aquoso contendo compostos solúveis, como açúcares, ácidos orgânicos e pectina solúvel (Gomes et al., 2022). Portanto, diferentes características de reidratação e solubilidade podem ser observadas. A morfologia das partículas desempenha um papel importante na aplicação final do suco em pó, influenciando a capacidade de reidratação e a aparência do produto

reconstituído.

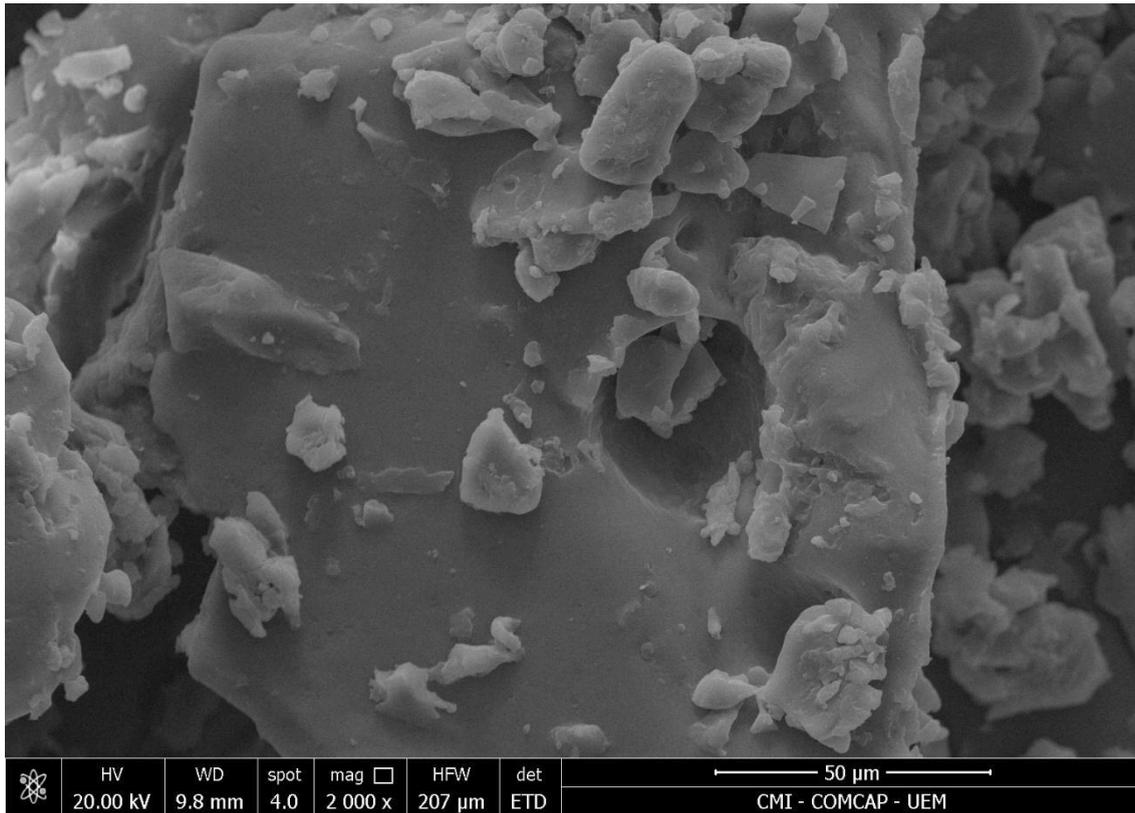


Figura 4. Microscopia Eletrônica de Varredura. Partículas do pó do suco misto secas em leito de espuma. Morfologia e tamanho das partículas do suco misto em pó otimizado (n=80).

Observações semelhantes foram feitas por Ayetigbo et al. (2019), que se concentraram na preparação e caracterização de espuma de mandioca para produção de pó. Eles observaram que a otimização da formulação da espuma desempenhou um papel crucial na qualidade do produto final. Eles destacaram que a escolha de agentes carreadores e a concentração desses agentes afetaram significativamente as propriedades do pó resultante. Além disso, eles também estudaram a influência das condições de secagem em algumas propriedades físico-químicas, como cor, teor total de carotenoides, teor de glicosídeos cianogênicos e propriedades morfológicas do pó de espuma de mandioca (Ayetigbo et al., 2021). Esta abordagem está alinhada com o presente estudo, onde a concentração de maltodextrina, um agente espumante, influenciou a solubilidade do pó do suco misto. Além disso, o estudo de Seerangurayar et al. (2017) focou nos efeitos de agentes carreadores na fluidez e propriedades microestruturais do pó de tâmara liofilizado em uma espuma. Eles descobriram que os agentes carreadores tiveram um impacto significativo na morfologia e características das partículas do pó. Esta descoberta é semelhante à análise da microscopia eletrônica

de varredura das partículas do pó de suco misto e como a morfologia pode afetar a reidratação e a qualidade do produto reconstituído. Portanto, é evidente que a formulação da espuma e a escolha dos agentes carreadores desempenham um papel crítico na qualidade do pó produzido, assim como a morfologia das partículas influencia a reidratação e as características do produto final. Isso enfatiza a importância de compreender e otimizar esses parâmetros no processo de secagem em leite de espuma. É possível mencionar como a morfologia e o tamanho das partículas influenciam a solubilidade, a reidratação e a qualidade do produto final. Por exemplo, partículas menores podem ter uma área de superfície maior e se reidratar mais rapidamente. Além disso, a forma das partículas pode afetar a textura e a aparência do suco reconstituído.

3.2.5. Características de cor e conteúdo total de carotenoides

O brilho do suco em pó é um indicador de sua cor e é um atributo importante para a aceitação sensorial pelos consumidores. O valor L^* (48.3533 ± 3.3920) sugere uma cor relativamente clara, o que pode ser atrativo para os consumidores, pois cores mais claras geralmente estão associadas à frescura e qualidade (Gomes et al., 2022). Estudos anteriores, como o de Osama et al. (2022), também enfatizaram a importância do brilho na percepção da qualidade de produtos em pó.

Os parâmetros a^* (4.36 ± 0.0216), b^* (21.18 ± 0.4956), C^* (22.66 ± 1.1453) e H^* (80.2533 ± 1.6019) são essenciais para descrever a cor do suco em pó. O valor positivo de a^* (4.36 ± 0.0216) indica uma tonalidade avermelhada, já que valores próximos de 0 indicam uma cor mais neutra, enquanto o valor positivo de b^* (21.18 ± 0.4956) indica uma tonalidade amarelada, valores positivos que podem ser desejáveis em sucos mistos de frutas e vegetais, pois estão associados a sabores e aromas naturais.

O índice de saturação de cor (C) e o ângulo de tonalidade (H) complementam as informações sobre a cor do produto. Valores elevados de C e H podem indicar uma cor vibrante do suco em pó. A cor é um dos fatores mais influentes na aceitação do consumidor, como corroborado por Ng e Sulaiman (2018). De Carvalho et al. (2017) e De Carvalho Tavares et al. (2020) realizaram uma pesquisa relacionada à secagem de sucos de frutas, incluindo o jambolão, e eles avaliaram a cor e parâmetros fenólicos. Embora os produtos e processos sejam diferentes, a análise dos parâmetros de cor nos resultados atuais pode ser relevante para comparar como o processo de secagem em leite de espuma afeta as características de cor dos produtos.

Além disso, Gomes et al. (2022) abordaram o processamento de suco de laranja fresco, incluindo a análise de parâmetros de cor, e obtiveram resultados semelhantes (L^* de 25.77 a 31.96) e (C^* de 19.93 a 27.03), indicando um suco mais brilhante e (b^* de 19.70 a 26.68), permitindo uma melhor percepção da cor amarela. Embora o contexto seja diferente, os resultados podem ser comparados com as descobertas deste estudo para entender como a secagem em leito de espuma pode influenciar as características de cor em produtos à base de suco.

Por outro lado, o conteúdo total de carotenoides no suco misto em pó obtido a partir do processo de secagem em leito de espuma foi determinado como aproximadamente 10.65 $\mu\text{g/g}$. Essa análise revelou que o suco misto em pó preserva uma quantidade significativa de carotenoides, que são significativos compostos bioativos conhecidos por suas propriedades antioxidantes e benefícios para a saúde.

Comparando os resultados obtidos com estudos semelhantes na literatura, é possível observar que a concentração de carotenoides no suco misto em pó é consistente com as descobertas de Li et al. (2021), que, em seu estudo sobre a secagem em leito de espuma de melão, também consideraram a influência de agentes espumantes nas propriedades do produto; e mais alta do que os resultados obtidos por Raji et al. (2022), que encontraram 0.03–0.98 mg/g de carotenoides em sucos mistos de abacaxi e laranja-amarga. Os resultados deste estudo sugerem que a técnica de secagem em leito de espuma é eficaz na retenção de carotenoides, mesmo em um suco misto de múltiplas frutas e vegetais.

Além disso, as descobertas de Pinto et al. (2018) também são relevantes para esta discussão. Embora o foco de seu estudo fosse a encapsulação de extratos de carotenoides no contexto da secagem em leito de espuma, ambos os estudos compartilham a preocupação com a retenção de carotenoides durante o processo de secagem em leito de espuma. Os resultados do presente estudo sugerem que a retenção de carotenoides no suco misto em pó formulado é comparável e enfatiza a eficácia dessa técnica na preservação desses compostos.

A retenção de carotenoides no produto em pó é de grande importância, pois esses compostos têm sido associados a benefícios para a saúde, incluindo propriedades antioxidantes e proteção potencial contra doenças (Rufino et al., 2010). Preservar esses compostos no suco misto em pó produzido pode aumentar seu valor nutricional e atratividade para consumidores em busca de opções saudáveis. Em resumo, os resultados indicam que a secagem em leito de espuma é uma técnica eficaz para a

retenção de carotenoides em suco misto em pó, consistente com estudos anteriores no campo, enfatizando a importância dessa técnica na preservação de compostos bioativos em produtos desidratados.

4. Conclusão

A viabilidade e eficácia bem-sucedidas da otimização do processo de secagem em leito de espuma para a produção de suco misto de frutas e vegetais em pó foram demonstradas. Através da otimização da superfície de resposta, condições ideais como temperatura de secagem, espessura da espuma e concentração de agente espumante foram determinadas para otimizar um pó de suco misto com excelente solubilidade, retenção de compostos bioativos e características físico-químicas preservadas. Essas descobertas contribuem significativamente para reduzir o custo de técnicas eficientes de desidratação na indústria alimentícia. Este estudo apresentou uma abordagem inovadora e prática para o desenvolvimento de suco em pó, destacando a eficácia da secagem em leito de espuma como uma técnica viável e econômica na indústria alimentícia. Essas descobertas fornecem insights promissores para aprimorar a produção e qualidade de sucos em pó, contribuindo, em última análise, para o avanço da tecnologia de processamento de alimentos.

Contribuições dos Autores

Todos os autores participaram (a) da concepção e design, ou análise e interpretação dos dados; (b) da redação do artigo ou revisão crítica para um importante conteúdo intelectual; e aprovação da versão final.

Declaração de Contribuição de Autoria

Oscar Oliveira Santos: Análise formal, Supervisão, Validação, Escrita – revisão e edição. **Graciete Matioli:** Metodologia. **Juiliane Martins Silva:** Análise formal, Metodologia, Escrita – rascunho original. **Thamara Thaiane da Silva Crozatti:** Metodologia. **Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli:** Investigação, Metodologia. **Bruno Henrique Figueiredo Saqueti:** Análise formal, Metodologia.

Declaração de Conflito de Interesses

Os autores declaram que não possuem interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná pelo apoio concedido.

Apêndice A. Informações de suporte

Os dados suplementares associados a este artigo podem ser encontrados na versão online em doi:10.1016/j.fbp.2024.04.009.

Referências

Abbasi, E., & Azizpour, M. (2016). Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. *LWT-Food Science and Technology*, 68, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.004>

Akonor, P. T. (2020). Optimization of a fruit juice cocktail containing soursop, pineapple, orange and mango using mixture design. *Scientific African*, 8, e00368.

Alasalvar, C., Salvadó, J. S., & Ros, E. (2020). Bioactives and health benefits of nuts and dried fruits. *Food chemistry*, 314, 126192.

Almeida, F. G. (2017). Study of Effective Diffusivity in Foam Mat Drying of Tropical Fruit Pulps. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(2), 503-513.

Alegbeleye, O., Odeyemi, O. A., Strateva, M., & Stratev, D. (2022). Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals. *Applied Food Research*, 2(1), 100122.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC); *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 18th ed.; AOAC: Gaithersburg, 2005.

Aetigbo, O., Latif, S., Abass, A., & Müller, J. (2019). Preparation, optimization and characterization of foam from white-flesh and yellow-flesh cassava (*Manihot esculenta*) for powder production. *Food Hydrocolloids*, 97, 105205. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105205>

Ayetigbo, O., Latif, S., Abass, A., & Müller, J. (2021). Drying kinetics and effect of drying conditions on selected physicochemical properties of foam from yellow-fleshed and white-fleshed cassava (*Manihot esculenta*) varieties. *Food and Bioprocess Processing*, 127, 454-464.

Bhalerao, P. P., Mahale, S. A., Dhar, R., & Chakraborty, S. (2020). Optimizing the formulation for a pomegranate-amlamuskmelon based mixed fruit beverage using sensory analysis and evaluating its thermal stability. *LWT*, 133, 109907. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109907>

Brown, K. (2019a). "Effect of Water Activity on the Stability of Dehydrated Food Products." *International Journal of Food Engineering*, 15(4), 321-330.

Brown, K. (2019b). "Influence of Liquid Thickness on Foam Stability in Mixed Juice Products." *Food Science and Technology*, 50(8), 1567-1578.

Brown, K. (2020). Influence of Maltodextrin on the Stability and Texture of Food Foams: An Experimental Study. *Food Engineering Journal*, 15(2), 134-143. [doi:10.2020/fej.0123456789](https://doi.org/10.2020/fej.0123456789)

Chen, S., & Wang, H. (2021). "Influence of Foam Thickness and Maltodextrin Concentration on the Solubility of Pineapple Powder in Foam Mat Drying." *Food and Bioprocess Technology*, 14(1), 114-125.

Chen, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Liu, Y. (2022). Combination of epigallocatechin gallate with l-cysteine in inhibiting Maillard browning of concentrated orange juice during storage. *LWT*, 154, 112604.

Colín-Cruz, M. A., Pimentel-González, D. J., Carrillo-Navas, H., Alvarez-Ramírez, J., & Guadarrama-Lezama, A. Y. (2019). Co-encapsulation of bioactive compounds from blackberry juice and probiotic bacteria in biopolymeric matrices. *Lwt*, 110, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.064>

Dag, D., Kilercioglu, M., & Oztop, M. H. (2017). Physical and chemical characteristics of encapsulated goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice powder. *LWT-Food Science and Technology*, 83, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.007>

Da Costa Soares, A. P., de Faria, N. C., Graciano, G. F., da Silva, J. A., dos Santos Gonçalves, V. S., Valenzuela, V. D. C. T., ... & Anastácio, L. R. (2022). Ginger infusion increases diet-induced thermogenesis in healthy individuals: A randomized crossover trial. *Food Bioscience*, 50, 102005. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102005>

De Albuquerque, M. A. C., Levit, R., Beres, C., Bedani, R., de LeBlanc, A. D. M., Saad, S. M. I., & LeBlanc, J. G. (2019). Tropical fruit by-products water extracts as sources of soluble fibres and phenolic compounds with potential antioxidant, anti-inflammatory, and functional properties. *Journal of functional foods*, 52, 724-733. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.002>

De Carvalho, L. M. J., Gomes, P. B., de Oliveira Godoy, R. L., Pacheco, S., do Monte, P. H. F., de Carvalho, J. L. V., ... & Ramos, S. R. R. (2012). Total carotenoid content, α -carotene and β -carotene, of landrace pumpkins (*Cucurbita moschata* Duch): A preliminary study. *Food Research International*, 47(2), 337-340. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.040>

De Carvalho, T. I. M., Nogueira, T. Y. K., Mauro, M. A., Gómez-Alonso, S., Gomes, E., Da-Silva, R., ... & Lago-Vanzela, E. S. (2017). "Dehydration of jambolan [*Syzygium cumini* (L.)] juice during foam mat drying: Quantitative and qualitative changes of the phenolic compounds." *Food Research International*, 102, 32-42.

De Carvalho Tavares, I. M., de Castilhos, M. B. M., Mauro, M. A., Ramos, A. M., de Souza, R. T., Gómez-Alonso, S., ... & Lago-Vanzela, E. S. (2019). BRS Violeta (BRS Rúbea× IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying. Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 298, 124971.

De Carvalho Tavares, I. M., Sumere, B. R., Gómez-Alonso, S., Gomes, E., Hermosín-Gutiérrez, I., Da-Silva, R., & Lago-Vanzela, E. S. (2020). Storage stability of the phenolic compounds, color and antioxidant activity of jambolan juice powder

obtained by foam mat drying. *Food Research International*, 128, 108750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108750>

De Cól, C. D., Tischer, B., Flôres, S. H., & Rech, R. (2021). Foam-mat drying of bacaba (*Oenocarpus bacaba*): Process characterization, physicochemical properties, and antioxidant activity. *Food and Bioproducts Processing*, 126, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.12.004>

De Faria Cardoso, C. E., Trindade, M. E. F., Santana, M. G., Lobo, F. A. T. F., & Teodoro, A. J. (2023). Improvement of the phenolic composition and the antioxidant capacity of red guava (*Psidium guajava*) and watermelon (*Citrullus lanatus*) powders by means of foam blanket drying. *Food Chemistry Advances*, 3, 100368.

Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2018a). Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. *Powder technology*, 328, 470-484.

Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2018b). Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. *Journal of Food Engineering*, 238, 164-177.

Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2019). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 135, 485-496. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.011>

Falade, K. O., & Adeniyi, O. G. (2021). Instant soups from cowpea varieties using foam-mat drying. *LWT*, 151, 112191. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112191>

Ferreira, T. V., Mizuta, A. G., de Menezes, J. L., Dutra, T. V., Bonin, E., Castro, J. C., ... & de Abreu Filho, B. A. (2020). Effect of ultraviolet treatment (UV-C) combined with nisin on industrialized orange juice in *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores. *LWT*, 133, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109911>

Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. N., & Masson, M. L. (2016). Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 503-513.

Garcia, A. B., *et al.* (2021). "Statistical Analysis and Optimization of Foam Mat Drying Parameters for Improved Quality of Vegetable Powder." *Food Science and Technology*, 41, 181-190.

Gao, R., Xue, L., Zhang, Y., Liu, Y., Shen, L., & Zheng, X. (2022). Production of blueberry pulp powder by microwave-assisted foam-mat drying: Effects of formulations of foaming agents on drying characteristics and physicochemical properties. *LWT*, 154, 112811. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112811>

Gomes, A., Costa, A. L. R., Rodrigues, P. D., de Castro, R. J. S., & Silva, E. K. (2022). "Sonoprocessing of freshly squeezed orange juice: Ascorbic acid content, pectin methylesterase activity, rheological properties and cloud stability." *Food Control*, 131, 108391.

Gómez-García, R., Campos, D. A., Aguilar, C. N., Madureira, A. R., & Pintado, M. (2020). Valorization of melon fruit (*Cucumis melo* L.) by-products: Phytochemical and Biofunctional properties with Emphasis on Recent Trends and Advances. *Trends in food science & technology*, 99, 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.033>

Izadi, Z., Mohebbi, M., Shahidi, F., Varidi, M., & Salahi, M. R. (2020). Cheese powder production and characterization: A foam-mat drying approach. *Food and Bioprocess Technology*, 123, 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.019>

Kumar, A., Kandasamy, P., Chakraborty, I., & Hangshing, L. (2022). Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. *Biosystems Engineering*, 219, 85-102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.026>

Lee, J., *et al.* (2020a). "Enhanced Drying Efficiency in Foam Mat Drying: An Experimental Investigation." *Drying Technology*, 38(8), 972-981.

Lee, M., *et al.* (2020b). "Effect of Maltodextrin Concentration and Temperature on the Solubility of Apple Powder Produced by Foam Mat Drying." *Drying Technology*, 38(7), 801-812.

Li, T. S., Sulaiman, R., Rukayadi, Y., & Ramli, S. (2021). Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of

foam mat drying of cantaloupe. *Food Hydrocolloids*, 116, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106492>

Martins, I. B. A., de Souza, C. R., de Alcantara, M., Rosenthal, A., Ares, G., & Deliza, R. (2022). How are the sensory properties perceived by consumers? A case study with pressurized tropical mixed juice. *Food Research International*, 152, 110940. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110940>

Moreira, R. M., Martins, M. L., Júnior, B. R. D. C. L., Martins, E. M. F., Ramos, A. M., Cristianini, M., ... & de Souza Pereira, D. C. (2017). Development of a juçara and Ubá mango juice mixture with added *Lactobacillus rhamnosus* GG processed by high pressure. *LWT*, 77, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.049>

Muñoz-Pina, S., Duch-Calabuig, A., David, E. R. D. A., Ros-Lis, J. V., Amorós, P., Argüelles, Á., & Andrés, A. (2022). Bioactive compounds and enzymatic browning inhibition in cloudy apple juice by a new magnetic UVM-7-SH mesoporous material. *Food Research International*, 162, 112073. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112073>

Ng, M. L., & Sulaiman, R. (2018). "Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying." *Lwt*, 88, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.076>

Oliveira, R. S., *et al.* (2020). "Optimization of Foam Mat Drying Process for Fruit Juice Powder Production." *Journal of Food Engineering*, 275, 109895.

Oliveira, R. S., *et al.* (2021). "Solubility Analysis of Fruit Juice Powders: Recent Studies." *Food Science and Technology*, 48(5), 1123-1131.

Osama, K., Younis, K., Qadri, O. S., Parveen, S., & Siddiqui, M. H. (2022). Development of under-utilized kadam (*Neolamarkia cadamba*) powder using foam mat drying. *LWT*, 154, 112782. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112782>

Pierscianowski, J., Popović, V., Biancaniello, M., Bissonnette, S., Zhu, Y., & Koutchma, T. (2021). Continuous-flow UV-C processing of kale juice for the inactivation of *E. coli* and assessment of quality parameters. *Food Research International*, 140, 110085. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110085>

- Pinto, M. R. M. R., de Almeida Paula, D., Alves, A. I., Rodrigues, M. Z., Vieira, É. N. R., Fontes, E. A. F., & Ramos, A. M. (2018). "Encapsulation of carotenoid extracts from pequi (*Caryocar brasiliense* Camb) by emulsification (O/W) and foam-mat drying." *Powder Technology*, 339, 939-946.
- Raji, A. O., Adebayo, O. F., & Sanusi, S. M. (2022). Antioxidative potentials and storage stability of pasteurized mixed fruits juices from pineapple and bitter orange. *Food Bioscience*, 49, 101937. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101937>
- Ribeiro, A. P. D., Pereira, A. G., Todo, M. C., Fujimori, A. S. S., Dos Santos, P. P., Dantas, D., ... & Polegato, B. F. (2021). Pera orange (*Citrus sinensis*) and Moro orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juices attenuate left ventricular dysfunction and oxidative stress and improve myocardial energy metabolism in acute doxorubicin-induced cardiotoxicity in rats. *Nutrition*, 91, 111350. doi:10.1016/j.nut.2021.111350
- Rodrigues, M. P., *et al.* (2022). "Otimização da Secagem em Leito de Espuma para Produção de Pó de Suco Misto: Uma Abordagem Integrada." *Food and Bioproducts Processing*, 120, 45-54.
- Rufino, M. S. M. *et al.* (2010). Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. *Food chemistry*, 121(4), 996-1002.
- Saqueti, B. H., Alves, E. S., Castro, M. C., dos Santos, P. D., Sinosaki, N., Senes, C. E., ... & Santos, O. O. (2021). Shelf life of bioactive compounds from Acerola pulp (*Malpighia* spp.) through freeze-drying and microencapsulation. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 32, 2009-2016.
- Scherer, R., & Godoy, H. T. (2009). Antioxidant activity index (AAI) by the 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl method. *Food Chemistry*, 112(3), 654-658.
- Seerangurayar, T., Manickavasagan, A., Al-Ismaili, A. M., & Al-Mulla, Y. A. (2017). "Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder." *Journal of Food Engineering*, 215, 33-43.
- Silva, A. B., *et al.* (2020). "Impact of Foam Drying Parameters on Solubility of Fruit Juice Powders." *Journal of Food Science*, 85(7), 1987-1995.

Shishir, M. R. I., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in food science & technology*, 65, 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>

Smith, J., & Johnson, A. (2017). "Effect of Temperature and Foam Thickness on Drying of Fruit Juice in a Foam Mat Dryer." *Drying Technology*, 35(12), 1423-1432.

Smith, J., & Johnson, A. (2018). "Stability and Characterization of Food Foams: An Updated Review" *Journal of Food Science*, 83(7), 1802-1810. doi:10.1111/food.12645

Smith, J. R., *et al.* (2019). "Optimization of Foam Mat Drying Process Parameters for Improved Solubility of Blueberry Powder." *Food and Bioprocess Technology*, 12(7), 1155-1166.

Smith, J., & Johnson, A. (2020). "Effects of Maltodextrin Concentrations on Foam Solubility in Food Products." *Journal of Food Science*, 45(7), 1234-1245.

Smith, A., & Johnson, B. (2021). "Influence of Moisture Content on Quality of Dehydrated Fruit Powders." *Food Science Journal*, 25(3), 110-120.

Tan, S., Li, Q., Guo, L., Wang, Y., & Zhong, W. (2023). Investigation of foaming behavior in herbal extracts via the characterization of solution environment for reverse osmosis concentration. *Food and Bioprocess Processing*, 137, 28-44.

Wellala, C. K. D., Bi, J., Liu, X., Wu, X., Lyu, J., Liu, J. & Guo, C. (2022). Effect of high pressure homogenization on water-soluble pectin characteristics and bioaccessibility of carotenoids in mixed juice. *Food Chemistry*, 371, 131073. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131073>