



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA**

Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Alimentos



YURI FURINI FONSECA

**Obtenção e caracterização da folha da capuchinha (*Tropaeolum majus*
L.) em pó, em *spray dryer*.**

Patos de Minas - MG

2026

YURI FURINI FONSECA

**Obtenção e caracterização da folha da capuchinha (*Tropaeolum
majus* L.) em pó, em *spray dryer*.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a Dr^a Vivan Consuelo Reolon Schmidt

Coorientador (a): Prof^a Dr^a Marta Fernanda Zotarelli

Coorientador (a): Prof^a Dr^a Érika Maria Marcondes Tassi

Patos de Minas - MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F676 2026	Fonseca, Yuri Furini, 1996- Obtenção e caracterização da folha da capuchinha (<i>Tropaeolum majus</i> L.) em pó, em spray dryer. [recurso eletrônico] / Yuri Furini Fonseca. - 2026. Orientadora: Vivan Consuelo Reolon Schmidt. Coorientadora: Érika Maria Marcondes Tassi . Coorientadora: Marta Fernanda Zotarelli. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Modo de acesso: Internet. DOI http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.704 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Alimentos - Indústria. I. Schmidt, Vivan Consuelo Reolon, 1980-, (Orient.). II. , Érika Maria Marcondes Tassi, 1972-, (Coorient.). III. Zotarelli, Marta Fernanda, 1985-, (Coorient.). IV. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. V. Título. CDU: 664
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia de Alimentos				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico n. 9/2026 - PPGEA				
Data:	Vinte e oito de setembro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	42412EAL018				
Nome do Discente:	Yuri Furini Fonseca				
Título do Trabalho:	Obtenção e caracterização da folha da capuchinha (<i>Tropaeolum majus</i> L.) em pó, em spray dryer				
Área de concentração:	Engenharia de Alimentos				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento de Processos e Produtos				

Reúne-se por webconferência (ConferênciaWeb - RNP) a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, assim composta: Vivian Consuelo Reolon Schmidt (Presidente/Orientadora), Barbara Daniele Almeida Porciuncula (Membro Externo) e Richtier Gonçalves da Cruz (Membro UFU).

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa apresentou a Comissão Examinadora e o discente, agradeceu a participação do público e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação se deu em conformidade às normas do Programa.

A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos legais, a Banca Examinadora, em sessão reservada, atribuiu o conceito final, considerando o discente:

Aprovado.

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico integra os requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme será assinada pela Banca Examinadora.

Ata de Defesa - Pós-Graduação 9 (7770349)

SEI 23117.070398/2026-87 / pg. 1



Documento assinado eletronicamente por **Richtier Gonçalves da Cruz, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/09/2026, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vivian Consuelo Reolon Schmidt, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/09/2026, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Barbara Daniele Almeida Porciuncula, Usuário Externo**, em 29/09/2026, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7770349** e o código CRC **8762E245**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por ter me concedido fé e força para chegar até aqui, foram dias de muito esforço, comprometimento e resiliência, e graças a Ele eu consegui concluir mais essa etapa. À minha mãe Sandra que sempre me apoiou nas minhas escolhas e nunca mediu esforços para me ajudar, agradeço a ela também pelo amor incondicional, carinho e incentivo durante toda minha vida.

À Universidade Federal de Uberlândia e a todos do programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.

À minha orientadora Vivian Consuelo Reolon Schmidt e as minhas coorientadoras Dra. Érika Maria Marcondes Tassi e Dra. Marta Fernanda Zotarelli por seus ensinamentos, paciência, pelo carinho, apoio, atenção e disponibilidade em todas as etapas desse trabalho, tenho um enorme carinho e admiração por todas vocês, serei eternamente grato!

Aos membros da banca, por aceitarem avaliar este trabalho e por suas sugestões e considerações.

Aos demais professores que auxiliaram direta ou indiretamente com seus ensinamentos oferecidos para a realização desse trabalho.

Aos técnicos do laboratório, em especial Betânia e Luiz André, obrigado pelos ensinamentos, pela paciência e auxílio na realização dos experimentos.

A todos meus colegas pelas contribuições, em especial às minhas amigas Jenyffie, Carolina e Daniela pelo apoio e ajuda ofertados ao longo desses anos.

Aos meus amigos que me incentivaram, ajudaram e motivaram com palavras, conversas e exemplos de si próprios, que contribuíram para a conclusão dos diversos desafios que apareceram.

São inúmeras as pessoas que fizeram parte dessa minha jornada e que colaboraram com essa conquista, apesar de não conseguir citar o nome de todas, eu gostaria de expressar meu agradecimento a cada uma delas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	9
RESUMO	3
ABSTRACT.....	4
1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo Geral	6
2.2 Objetivos Específicos	6
3 ESTRUTURA DO trabalho	7
CAPÍTULO 1 - Avaliação das propriedades FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS da Capuchinha (<i>Tropaeolum majus L.</i>) e seus possíveis métodos de secagem.	8
CHAPTER 1 - Evaluation of the PHYSICOCHEMICAL properties AND BIOACTIVE COMPOUNDS of Nasturtium (<i>Tropaeolum majus L.</i>) and its poTENTIAL dryING methods.....	8
RESUMO	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 METODOLOGIA.....	11
3 ASPECTOS BOTÂNICOS E USOS TRADICIONAIS	12
3.1 Compostos Bioativos e Propriedades Nutracêuticas.....	16
4 MÉTODOS DE SECAGEM DE PLANTAS MEDICINAIS E ALIMENTÍCIAS	17
4.1 Secagem Natural (à Sombra ou ao Sol).....	18
4.2 Secagem em Estufa	19
4.3 Liofilização (Secagem por sublimação).....	20
4.4 Secagem por Micro-ondas	21

5	INFLUÊNCIA DA SECAGEM NAS PROPRIEDADES FITOQUÍMICAS	22
6	POTENCIAL DE APLICAÇÃO DA CAPUCHINHA NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA E FITOTERÁPICA	24
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
8	REFERÊNCIAS	26
	CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS DAS FOLHAS DA CAPUCHINHA APÓS SECAGEM EM <i>SPRAY DRYER</i>	32
	RESUMO	32
1	INTRODUÇÃO	33
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
2.1	Obtenção da matéria prima	34
2.2	Preparo das amostras	35
2.3	Obtenção do pó.....	37
2.4	Caracterização físico-química das folhas frescas e do produto em pó	38
2.4.1	Determinação da Umidade	39
2.4.2	Determinação da atividade de água	39
2.4.3	Determinação da cor	40
2.4.4	Determinação da concentração de clorofila total e carotenoides	40
2.4.5	Determinação da higroscopicidade.....	41
2.4.6	Determinação da densidade bulk	42
2.4.7	Rendimento	42
2.4.8	Determinação do tempo de molhamento.....	42
2.5	Determinação da composição centesimal	43
2.5.1	Determinação do teor de proteína	43

2.5.2	Determinação do teor de lipídeos	44
2.5.3	Determinação do teor de cinzas	44
2.5.4	Determinação do teor de fibra bruta	45
2.5.5	Determinação de carboidratos.....	46
2.6	Determinação do teor de compostos fenólicos totais	46
2.6.1	Extração dos fenólicos totais	46
2.6.2	Quantificação dos fenólicos totais	46
2.6.3	Análise Estatística	47
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
3.1	Composição centesimal	48
3.2	Umidade.....	50
3.3	Atividade de água.....	52
3.4	Cor	55
3.5	Determinação do teor de clorofila total.....	60
3.6	Determinação da concentração de carotenoides	64
3.7	Determinação do teor de fenólicos totais	67
3.8	Higroscopicidade.....	71
3.9	Densidade <i>bulk</i>	74
3.10	Rendimento	77
3.11	Determinação do tempo de molhamento	80
4	CONCLUSÃO.....	84
5	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
6	REFERÊNCIAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico dos números de estudos selecionados nesta revisão, por ano pesquisado, no intervalo de 1999 a 2025.....	12
Figura 2 – Fotografia das folhas e flores da Capuchinha (<i>Tropaeolum majus</i> L.).....	14
Figura 3 - Fluxograma do preparo das amostras.....	36
Figura 4 - Extrato de capuchinha preparado sem branqueamento.....	36
Figura 5 - Spray dryer utilizado para a secagem de extrato da capuchinha, em que: (1 e 2) representam a localização do bico atomizador e a entrada de ar e solução; (3) o ciclone; (4) a câmara de secagem e (5) a exaustão de ar e partícula mais finas (não coletadas).....	37
Figura 6 - Esquema do dispositivo usado para determinar o tempo de molhamento.....	43
Figura 7 - Esquema do dispositivo usado para determinar o tempo de molhamento.....	43
Figura 8 - a) Folhas de capuchinha frescas e b) pó obtido, após processo de secagem por spray dryer, (experimento 6).....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento Fatorial a dois níveis completo com 3 variáveis (2 ³).....	38
Tabela 2 - Resultados da caracterização da composição centesimal das folhas frescas de capuchinha.	48
Tabela 3 - Resultados da umidade das folhas frescas e dos pós de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.	50
Tabela 4 - Resultados da caracterização da atividade de água dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.	53
Tabela 5 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para atividade de água.	55
Tabela 6 - Resultados da caracterização da cor das folhas frescas e dos pós de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.....	57
Tabela 7 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para atividade de água.	60
Tabela 8 - Resultados da concentração de clorofila total das folhas frescas e dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer....	61
Tabela 9 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para concentração de clorofila total.	63
Tabela 10 - Resultados da concentração de carotenoides das folhas frescas e dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.	65
Tabela 11 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para concentração de carotenoides.....	67
Tabela 12 - Resultados do teor de fenólicos totais das folhas frescas e dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.	69
Tabela 13 - Resultados da caracterização da higroscopicidade dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.	72
Tabela 14 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para higroscopicidade.	74
Tabela 15 - Resultados da caracterização de densidade bulk dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.....	75

Tabela 16 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para densidade bulk.....	77
Tabela 17 - Resultados do rendimento dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.....	78
Tabela 18 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para rendimento.	80
Tabela 19 - Resultados do tempo de molhamento dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de spray dryer.	82

RESUMO

A capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) é uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC) de interesse nutricional e funcional, destacando-se pela presença de compostos bioativos associados a diferentes propriedades nutraceuticas. Entretanto, a elevada umidade das folhas frescas pode limitar sua conservação e utilização, tornando necessário o emprego de técnicas de processamento capazes de aumentar sua estabilidade e preservar suas características de interesse. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades nutraceuticas da capuchinha e investigar a influência das condições de secagem sobre as características físico-químicas e os compostos bioativos das folhas, com ênfase na secagem por *spray dryer*. O trabalho foi estruturado em dois capítulos. O primeiro consistiu em uma revisão de literatura sobre as propriedades nutraceuticas da *T. majus* e os principais métodos de secagem aplicados a plantas alimentícias e medicinais, contemplando estudos publicados entre 1999 e 2025. Foram selecionados 45 trabalhos, permitindo a sistematização das informações relacionadas aos compostos bioativos da espécie e à influência das diferentes técnicas de secagem sobre sua conservação. No segundo capítulo, as folhas de capuchinha foram submetidas à secagem por *spray dryer*, utilizando planejamento fatorial completo 2^3 , com avaliação dos efeitos da temperatura do ar de secagem, da vazão de alimentação e da vazão de ar. As folhas frescas apresentaram teor de umidade de 81,97%, além de expressivos teores de proteína, fibra bruta e cinzas em base seca. Os pós obtidos apresentaram umidade entre 5,58 e 7,87% e atividade de água inferior a 0,300 em todas as condições avaliadas, indicando condições favoráveis à estabilidade do produto. As condições de processamento influenciaram diferentes propriedades dos pós, com destaque para a temperatura, que apresentou efeito significativo sobre a preservação dos pigmentos e o rendimento do processo. O maior rendimento obtido foi de 56,96%, na condição de 140 °C, vazão de alimentação de 0,40 L·h⁻¹ e vazão de ar de 1,60 m³·min⁻¹. Entretanto, a condição de 100 °C, 0,40 L·h⁻¹ e 1,60 m³·min⁻¹ apresentou melhor desempenho na preservação dos compostos bioativos, com 1500,75 mg·100 g⁻¹ de clorofila total, 39,93 mg·100 g⁻¹ de carotenoides e elevado teor de compostos fenólicos totais. As menores temperaturas também favoreceram menores tempos de molhamento, indicando melhores características de reconstituição dos pós. Dessa forma, os resultados demonstram que a secagem por *spray dryer* apresenta potencial para o aproveitamento tecnológico da capuchinha, sendo que, dentro das condições avaliadas, temperaturas moderadas foram mais adequadas para a preservação do potencial nutraceutico, enquanto temperaturas mais elevadas favoreceram o rendimento do processo. O estudo contribui para o conhecimento sobre o processamento da *T. majus* e fornece subsídios para sua utilização como ingrediente vegetal em produtos alimentícios e nutraceuticos.

Palavras-chave: *Tropaeolum majus* L.; Plantas Alimentícias Não Convencionais; Compostos bioativos; Secagem por atomização; *Spray dryer*.

ABSTRACT

Nasturtium (*Tropaeolum majus* L.) is an unconventional edible plant with nutritional and functional potential, particularly due to the presence of bioactive compounds associated with nutraceutical properties. However, the high moisture content of fresh leaves may limit their preservation and use, making drying an important alternative for increasing stability while maintaining desirable characteristics. Therefore, this study aimed to evaluate the nutraceutical properties of nasturtium and investigate the influence of drying conditions on the physicochemical characteristics and bioactive compounds of its leaves, with emphasis on spray drying. The study was structured into two chapters. The first chapter consisted of a literature review addressing the nutraceutical properties of *T. majus* and the main drying methods applied to edible and medicinal plants, including studies published between 1999 and 2025. A total of 45 studies were selected, allowing the available evidence regarding the bioactive compounds of the species and the effects of different drying techniques on their preservation to be systematized. In the second chapter, nasturtium leaves were subjected to spray drying using a complete 2^3 factorial design to evaluate the effects of drying air temperature, feed flow rate, and air flow rate. Fresh leaves showed a moisture content of 81.97%, as well as expressive levels of protein, crude fiber, and ash on a dry basis. The resulting powders showed moisture contents ranging from 5.58 to 7.87%, while water activity remained below 0.300 under all evaluated conditions, indicating favorable conditions for product stability. Processing conditions significantly affected several powder properties, particularly temperature, which had a pronounced effect on pigment preservation and process yield. The highest yield, 56.96%, was obtained at 140 °C, with a feed flow rate of 0.40 L·h⁻¹ and an air flow rate of 1.60 m³·min⁻¹. However, the condition of 100 °C, 0.40 L·h⁻¹, and 1.60 m³·min⁻¹ showed better performance in preserving bioactive compounds, with 1500.75 mg·100 g⁻¹ of total chlorophyll, 39.93 mg·100 g⁻¹ of carotenoids, and a high total phenolic content. Lower drying temperatures also resulted in shorter wetting times, indicating improved powder reconstitution properties. Therefore, within the conditions evaluated, moderate temperatures were more suitable for preserving the nutraceutical potential of nasturtium, whereas higher temperatures favored process yield. Overall, the results demonstrate the potential of spray drying for the technological utilization of nasturtium and provide relevant information for its application as a plant-based ingredient in food and nutraceutical products.

Keywords: *Tropaeolum majus* L.; Unconventional edible plants; Bioactive compounds; *Spray drying*; *Spray dryer*.

1 INTRODUÇÃO

A busca por matrizes alimentares funcionais e plantas com propriedades terapêuticas expandiu-se nas últimas décadas, impulsionada pelo interesse na prevenção de enfermidades e na promoção da saúde. Nesse cenário, vegetais ricos em compostos bioativos e substâncias com potencial nutracêutico consolidaram-se como alvos de intensas investigações. Entre esses recursos, destacam-se as plantas medicinais e condimentares, que aliam a aplicabilidade culinária à presença de fitoquímicos de interesse farmacológico e nutricional (Ebert et al., 2021).

A capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) é uma planta amplamente utilizada na medicina popular e na gastronomia, conhecida por suas flores coloridas e sabor levemente picante. Nativa da América do Sul, ela se destaca por conter compostos como flavonoides, vitamina C, antocianinas, carotenoides e glucosinolatos, que contribuem para sua ação antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória e diurética. Esses atributos fazem da capuchinha uma promissora fonte de compostos nutracêuticos com aplicações terapêuticas e preventivas (Souza et al., 2020).

De acordo com Pacheco (2018), a preservação dos compostos bioativos presentes na planta está diretamente relacionada às condições de processamento empregadas. Nesse contexto, quando a secagem é utilizada, a escolha do método torna-se um fator relevante, visto que diferentes técnicas podem influenciar significativamente a integridade e a estabilidade dos princípios ativos. Métodos como a secagem natural, em estufa, por liofilização ou por micro-ondas, por exemplo, têm sido amplamente estudados devido ao impacto que causam nas propriedades físico-químicas e funcionais das plantas medicinais. Conforme Lima (2016), a escolha do método de secagem adequado é fundamental para preservar as características nutracêuticas da capuchinha. Técnicas que utilizam altas temperaturas ou longos tempos de exposição ao calor podem degradar compostos termossensíveis, enquanto métodos mais brandos ou modernos, como a liofilização, tendem a manter uma maior quantidade de bioativos. Assim, avaliar e comparar diferentes métodos torna-se

essencial para o uso eficiente da planta, tanto na indústria alimentícia quanto na farmacêutica.

Além da conservação dos compostos bioativos, os métodos de secagem também afetam outros parâmetros importantes, como a cor, o aroma, a textura e o rendimento da planta seca, o que influencia diretamente sua aceitação comercial e aplicação industrial. Nesse sentido, a escolha da técnica ideal deve considerar não apenas a preservação química, mas também a viabilidade econômica e operacional do processo (Pacheco, 2018).

A análise das propriedades nutraceuticas da capuchinha após submetê-la a diferentes métodos de secagem permite entender como os compostos bioativos se comportam diante de variações de temperatura, tempo e exposição ao oxigênio. A quantificação de antioxidantes, a capacidade de eliminação de radicais livres, o teor de compostos fenólicos e outros parâmetros bioquímicos são cruciais para estabelecer o valor funcional do produto final. Assim, essa abordagem possibilita não apenas o melhor aproveitamento da planta, mas também contribui para a padronização de processos em escala industrial (Mazzinghy et al., 2021; Samborska et al., 2019).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito das condições de secagem em *spray dryer* sobre as características físico-químicas, propriedades tecnológicas e preservação dos compostos bioativos das folhas de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.).

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a composição centesimal das folhas de capuchinha *in natura*;
- Obter pós de capuchinha por secagem em *spray dryer* sob diferentes condições operacionais;
- Caracterizar os pós quanto à umidade, atividade de água, cor, higroscopicidade, densidade *bulk*, rendimento e tempo de molhamento;

- Determinar os teores de clorofila total, carotenoides e compostos fenólicos totais das folhas *in natura* e dos pós obtidos após a secagem;
- Avaliar a influência da temperatura do ar de secagem, da vazão de alimentação e da vazão de ar sobre as características físico-químicas, propriedades tecnológicas e compostos bioativos dos pós;
- Identificar a condição experimental que apresentou o melhor equilíbrio entre rendimento, propriedades tecnológicas e preservação dos compostos bioativos.

3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido em formato de capítulo, em que cada capítulo é um artigo que será submetido a revistas diferentes. Assim, este trabalho está estruturado de maneira que os conteúdos abordados tenham uma sequência lógica. Desta maneira, os capítulos foram divididos da seguinte forma:

- Capítulo 1 apresenta a Revisão da Literatura, focando em compostos bioativos existente na capuchinha e seu interesse na indústria nutracêutica.
- Capítulo 2 aborda a parte experimental, sendo que foi realizada a secagem da capuchinha por spray dryer e posterior caracterização físico-química e de compostos fenólicos, clorofila e carotenoides.
- Capítulo 3 – Conclusões finais e Propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS DA CAPUCHINHA (*TROPAEOLUM MAJUS* L.) E SEUS POSSÍVEIS MÉTODOS DE SECAGEM.

CHAPTER 1 - EVALUATION OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND BIOACTIVE COMPOUNDS OF NASTURTIUM (*TROPAEOLUM MAJUS* L.) AND ITS POTENTIAL DRYING METHODS.

RESUMO

A capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) é uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC) de interesse nutricional e funcional, destacando-se pela presença de compostos bioativos associados a propriedades nutraceuticas. Esta revisão teve como objetivo analisar as propriedades nutraceuticas da espécie e os principais métodos de secagem empregados para sua conservação, com ênfase nos efeitos das condições de processamento sobre seus compostos bioativos. Foi realizada uma revisão bibliográfica de estudos publicados entre 1999 e 2025, sendo selecionados 45 trabalhos em português e inglês, de acordo com sua relevância para o tema. Os estudos demonstraram que a capuchinha apresenta potencial como fonte de compostos de interesse nutricional e funcional, incluindo carotenoides, compostos fenólicos, flavonoides, vitamina C e glucosinolatos. Em relação à secagem, verificou-se que diferentes métodos podem influenciar a retenção desses compostos e as características físico-químicas do produto, sendo a temperatura e o tempo de exposição ao calor fatores relevantes para sua preservação. A literatura também evidenciou que ainda são limitados os estudos que relacionam diretamente as condições de secagem à conservação dos compostos bioativos da *T. majus*. Dessa forma, a revisão reforça o potencial nutraceutico da capuchinha e a importância da seleção e otimização das condições de secagem para a obtenção de produtos estáveis e com características funcionais preservadas.

Palavras-chave: *Tropaeolum majus* L.; Plantas Alimentícias Não Convencionais; Compostos bioativos; Secagem.

ABSTRACT

Garden nasturtium (*Tropaeolum majus* L.) is an Unconventional Edible Plant (UEP) of nutritional and functional interest, distinguished by the presence of bioactive compounds associated with nutraceutical properties. This review aimed to analyze the nutraceutical properties of the species and the main drying methods employed for its preservation, emphasizing the effects of processing conditions on its bioactive compounds. A literature review of studies published between 1999 and 2025 was conducted, selecting 45 works in Portuguese and English based on their relevance to the topic. The studies demonstrated that *T. majus* holds potential as a source of compounds with nutritional and functional importance, including carotenoids, phenolic compounds, flavonoids, vitamin C, and glucosinolates. Regarding drying, it was found that different methods can influence the retention of these compounds and the physicochemical characteristics of the product, with temperature and heat exposure time being critical factors for their preservation. The literature also highlighted that studies directly linking drying conditions to the conservation of bioactive compounds in *T. majus* remain limited. Thus, this review reinforces the nutraceutical potential of garden nasturtium and underscores the importance of selecting and optimizing drying conditions to obtain stable products with preserved functional properties.

Keywords: *Tropaeolum majus* L.; Unconventional Edible Plants; Bioactive compounds; Drying.

1 INTRODUÇÃO

Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC), englobam espécies vegetais com potencial de consumo humano, mas que permanecem subutilizadas ou ausentes das cadeias produtivas e comerciais hegemônicas. No contexto da capuchinha, sua classificação como hortaliça não convencional reflete um modelo de produção intrinsecamente ligado à agricultura familiar e aos sistemas de base agroecológica, distanciando-se das monoculturas industriais. A cultura de consumo dessas espécies tem sido ressignificada pela busca por segurança alimentar e diversificação dietética, uma vez que o aproveitamento dessas matrizes oferece um elevado valor agregado devido à densidade de compostos bioativos, como os carotenoides, posicionando-as como elementos estratégicos para a promoção da saúde e o fortalecimento de nichos de mercado sustentáveis (Borguini et al., 2016).

Estima-se que, das 46.000 espécies vegetais brasileiras, cerca de 3.000 enquadram-se como plantas alimentícias não convencionais (PANC). Apesar de apresentarem elevado potencial bioativo, nutricional e tecnológico, tais matrizes continuam subaproveitadas. Vale destacar que o conceito de PANC é relativo e territorial, oscilando conforme a região geográfica e o histórico de consumo das populações locais (Egea e Lemes, 2025). Diversas PANC têm sido estudadas em modelos *in vivo* e *in vitro* como fonte de compostos bioativos e estão associadas a uma menor incidência de doenças crônicas, como doenças cardiovasculares, câncer e diabetes (Barrantes-Martínez et al., 2022).

Tropaeolum majus L., capuchinha, é amplamente cultivada como planta ornamental e comestível, além de ser descoberta como medicinal por suas propriedades antimicrobianas e antivirais, efeitos anti-inflamatórios e antioxidantes (Barrantes-Martínez et al., 2022). Esta espécie pertence à família *Tropaeolaceae* e apresenta partes comestíveis como folhas, flores e sementes verdes imaturas. Botões florais ainda não desenvolvidos e sementes verdes são usados como substitutos de alcaparras, e frutos verdes picados são adicionados a molhos tártaro em vez de raiz-forte (Barros et al., 2020).

Os bioativos mais presentes na capuchinha são compostos fenólicos e glucosinolatos (GLS), encontrados nas folhas, pétalas e sementes,

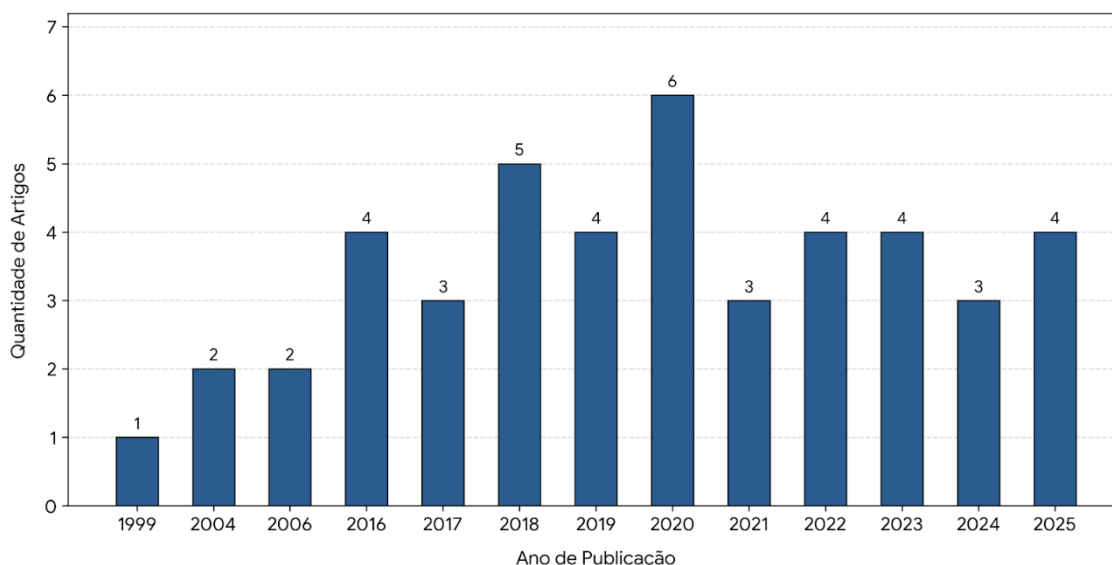
sendo que o principal glucosinolato (GLS) da capuchinha é a glucotropaeolina, e seu metabólito secundário, o isotiocianato de benzila (BITC) (Bortolini et al., 2022). Estes compostos presentes na *T. majus* podem apresentar instabilidade ao armazenamento e envelhecimento da planta. Assim, a secagem é interessante para obtenção de pós mais estáveis e, a secagem convectiva em temperaturas relativamente baixas (50 – 70°C) é recomendada para manter os componentes bioativos das plantas (Elgamal et al., 2023).

Embora o interesse pelas propriedades funcionais e terapêuticas das plantas alimentícias não convencionais (PANC) venha crescendo, a literatura sobre a *Tropaeolum majus* permanece fragmentada, especialmente no que tange às relações entre os métodos de secagem e a retenção de seus constituintes bioativos. Diante disso, esta revisão busca preencher essa lacuna ao sistematizar criticamente as evidências científicas sobre as propriedades nutraceuticas da espécie, confrontando as convergências e divergências operacionais das tecnologias de secagem aplicadas. Adicionalmente, identificam-se as variáveis de processo que determinam a degradação ou conservação dos fitocompostos, mapeando as principais limitações metodológicas da literatura atual e indicando direcionamentos prioritários para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

O tipo de pesquisa foi bibliográfico e empírico, com base em artigos científicos disponíveis nas plataformas *Google Acadêmico*, *SciELO*, *ScienceDirect* e periódicos especializados em engenharia de alimentos em geral e, em secagem, mais especificamente, além de publicações técnico-científicas nacionais e internacionais. A revisão de literatura contemplou trabalhos publicados entre 1999 e 2025, nos idiomas português e inglês. Embora a maior parte dos estudos analisados tenha sido publicada nos últimos anos, artigos anteriores foram incluídos devido à sua relevância e contribuição para a fundamentação teórica do tema, conforme apresentado na Figura 1. Utilizou-se palavras-chave como "drying of edible flowers", "drying temperature", "capuchinha" e "mass transfer".

Figura 1 - Gráfico dos números de estudos selecionados nesta revisão, por ano pesquisado, no intervalo de 1999 a 2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Foram selecionados 45 trabalhos, sendo que se aplicou o critério de exclusão para estudos que usaram apenas a palavra-chave "capuchinha", mas com foco na botânica, cultivo, agronomia, ou outras análises que não fossem a secagem. Também foi realizada exclusão por qualidade/adequação para trabalhos que, após leitura integral, mostraram resultados com metodologia questionável ou confusas ou que não contribuíam diretamente para os objetivos da introdução/fundamentação teórica.

3 ASPECTOS BOTÂNICOS E USOS TRADICIONAIS

Segundo Silva (2024), a capuchinha é uma planta herbácea pertencente à família *Tropaeolaceae*, originária da América do Sul, especialmente das regiões andinas. Suas flores coloridas e folhas arredondadas (Figura 2) são facilmente reconhecíveis, sendo cultivada tanto por seu valor ornamental quanto por suas propriedades alimentares e medicinais. Ela é adaptável a diferentes climas e amplamente cultivada em hortas urbanas e jardins caseiros.

Caracterizada por sua natureza suculenta e hábito de crescimento rasteiro, do ponto de vista botânico, a planta apresenta caules longos, moles e carnosos, com folhas de formato arredondado e coloração azul-esverdeada,

presas ao talo pela região central. Suas estruturas reprodutivas destacam-se pela presença de flores vistosas e afuniladas, cujas colorações abrangem uma paleta que varia do amarelo ao vermelho escuro, seguidas pela formação de frutos constituídos por três pequenos aquênios esverdeados (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006).

No contexto tradicional, a capuchinha é utilizada por comunidades locais em infusões, emplastros e como alimento funcional. Suas folhas, flores e sementes são comestíveis e possuem sabor levemente picante, semelhante ao do agrião. Na medicina popular é amplamente usada no tratamento de afecções respiratórias, problemas urinários, e como cicatrizante (Duran, 2022).

A aplicabilidade da capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) abrange desde o uso medicinal e ornamental até a inserção na alta gastronomia, sendo caracterizada pela comestibilidade de todas as suas partes aéreas. As folhas são amplamente utilizadas como hortaliças em saladas e no preparo de infusões, devido ao sabor picante característico e propriedades antissépticas e expectorantes (Ribeiro et al., 2011). No entanto, as flores têm conquistado maior valor agregado no mercado de alimentos funcionais, sendo valorizadas tanto pela estética quanto pela alta densidade de carotenoides, especialmente a luteína, que as posiciona como um ingrediente estratégico para a indústria de nutracêuticos (Borguini et al., 2016). Além disso, os botões florais e os frutos imaturos possuem aplicação na indústria de conservas como substitutos para as alcaparras, enquanto as sementes são estudadas por seu potencial na extração de óleos essenciais e compostos aromáticos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006).

Figura 2 – Fotografia das folhas e flores da Capuchinha (*Tropaeolum majus* L.).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Embora *Tropaeolum majus* L. seja uma espécie comumente utilizada na alimentação, especialmente na forma de folhas e flores, ainda não existe, na literatura científica, um limite máximo de ingestão diária ou uma ingestão diária tolerável (TDI) estabelecida especificamente para a espécie. Estudos toxicológicos pré-clínicos, entretanto, têm apresentado resultados favoráveis quanto à sua segurança. Traesel et al. (2017) avaliaram diferentes concentrações de extratos aquosos de *T. majus* (1,5; 7 e 15%) e não observaram efeitos genotóxicos significativos nos ensaios de mutagenicidade bacteriana, dano ao DNA e formação de micronúcleos. Adicionalmente, Araújo et al. (2018) avaliaram a administração oral diária, durante 90 dias, de extrato hidroetanólico das folhas de *T. majus* em camundongos e ratos nas doses de 75, 375 e 750

mg/kg, e em coelhos nas doses de 30, 150 e 300 mg/kg, não sendo observadas alterações relevantes nos pesos corporal e dos órgãos, parâmetros bioquímicos ou análises histopatológicas; pequenas alterações hematológicas foram observadas em ratos expostos à maior dose. Em humanos, Platz et al. (2016) avaliaram a ingestão de 10 g de folhas de *T. majus* liofilizadas, contendo 1.000 µmol de glucotropaeolina, em 15 indivíduos saudáveis, demonstrando a absorção e o metabolismo do benzil-isotiocianato, produto da hidrólise desse glicosinolato. De maneira semelhante, Schiess et al. (2017) administraram uma dose única de 10 g de folhas liofilizadas de *T. majus* a 15 homens metabolicamente saudáveis, sem relato de eventos adversos relacionados à intervenção. Apesar desses resultados indicarem um perfil de segurança favorável nas condições experimentais avaliadas, os dados disponíveis ainda são insuficientes para estabelecer uma quantidade máxima ou uma recomendação diária de consumo da espécie, especialmente para produtos obtidos a partir de folhas submetidas a processos de secagem e concentração. Portanto, os valores descritos na literatura devem ser interpretados como condições experimentais de exposição, e não como limites de consumo seguro para a população em geral.

Conforme Santos (2023), além de seu uso popular, a planta passou a ser objeto de estudos acadêmicos, que confirmaram diversas de suas propriedades atribuídas empiricamente. Pesquisas demonstram que os extratos da capuchinha apresentam atividade antimicrobiana, antioxidante, anti-inflamatória e imunomoduladora. Esses efeitos são atribuídos a compostos químicos presentes na planta, como os flavonoides, isotiocianatos e vitamina C.

A presença de glucosinolatos, compostos típicos e primários formados em plantas da ordem *Brassicales*, é de particular interesse por seu potencial anticancerígeno e detoxificante. Quando hidrolisados, esses compostos dão origem a isotiocianatos, compostos secundários que possuem ação na inibição de enzimas envolvidas na ativação de carcinógenos. Assim, o perfil fitoquímico da capuchinha justifica seu estudo como fonte nutracêutica (Nunes, 2022).

Dada a sua relevância terapêutica e potencial de uso na alimentação funcional, é essencial compreender os fatores que podem afetar a preservação de seus compostos ativos. Entre esses fatores, destaca-se o processamento

pós-colheita e, principalmente, o método de secagem utilizado, que pode impactar diretamente a qualidade do produto final.

3.1 Compostos Bioativos e Propriedades Nutracêuticas

O conceito de nutracêutico refere-se a qualquer substância que possa ser considerada um alimento ou parte dele e que proporcione benefícios médicos, incluindo a prevenção e o tratamento de patologias. Enquanto o alimento funcional é geralmente consumido em sua forma original na dieta, os nutracêuticos são frequentemente disponibilizados em formas farmacêuticas dosadas e concentradas, como cápsulas ou pós, contendo compostos bioativos isolados com atividade farmacológica comprovada (Moraes; Colla, 2006). Essa categoria atua na fronteira entre a nutrição e a farmacologia, sendo reconhecida por sua densidade de componentes biologicamente ativos.

De acordo com Santos (2023), compostos bioativos são substâncias naturais presentes em alimentos que exercem efeitos benéficos à saúde, além de suas funções nutricionais básicas. Eles atuam como moduladores de processos fisiológicos, sendo capazes de prevenir doenças ou promover o bem-estar. Dentre os principais grupos de compostos bioativos, destacam-se os polifenóis, carotenoides, alcaloides, saponinas e glucosinolatos.

A capuchinha é especialmente rica em flavonoides, como a quercetina e o kaempferol, que são conhecidos por sua potente ação antioxidantes. Esses compostos neutralizam os radicais livres, moléculas instáveis associadas ao envelhecimento celular e ao desenvolvimento de diversas patologias, como câncer, doenças cardiovasculares e distúrbios neurodegenerativos (Silva, 2018).

Conforme Rhoden (2023), outro grupo importante presente na capuchinha são os glucosinolatos, que após hidrólise enzimática originam isotiocianatos, com potencial quimiopreventivo. Esses compostos demonstraram, em estudos *in vitro* e *in vivo*, capacidade de induzir a apoptose de células tumorais e inibir a proliferação celular anormal, o que reforça sua importância no contexto da saúde preventiva. Além disso, a vitamina C presente na planta contribui para o fortalecimento do sistema imunológico, assim como potencializa a ação antioxidante de outros compostos bioativos. A presença de carotenoides, como

a luteína, também favorece a saúde ocular e exerce efeitos protetores contra danos oxidativos (Costa, 2019).

Sob a perspectiva toxicológica, embora a capuchinha seja segura para o consumo dietético, estudos demonstram que doses elevadas de seus extratos exigem cautela. A planta é rica em glucotropaeolina, que libera isotiocianato de benzila; em concentrações excessivas, esse composto pode atuar como irritante das mucosas gástricas. Adicionalmente, as sementes apresentam teores significativos de ácido erúico, associado a riscos cardiovasculares em ingestões massivas em modelos laboratoriais, além de haver contraindicação durante a gestação devido ao potencial de induzir contratilidade uterina (Brondani et al., 2016). Assim, a segurança do consumo está atrelada à moderação e ao respeito aos limites fisiológicos do organismo frente aos seus metabólitos secundários.

Portanto, os compostos bioativos da capuchinha oferecem uma ampla gama de benefícios à saúde humana. Contudo, a manutenção dessas substâncias depende diretamente das condições de colheita, armazenamento e, principalmente, do tipo de armazenamento utilizado para preservar o material vegetal. Neste sentido, avaliar métodos de secagem é necessário e sua aplicação é promissora, com o intuito de preservar as características nutraceuticas da PANC, aumentar sua estabilidade, estender sua vida útil e minimizar as perdas pós-colheita (Elgamal et al., 2023).

4 MÉTODOS DE SECAGEM DE PLANTAS MEDICINAIS E ALIMENTÍCIAS

Os principais mecanismos de deterioração dos alimentos são fortemente afetados pela temperatura, bem como pela concentração e mobilidade da água presente em sua estrutura (Elgamal et al., 2023). Segundo Mazzinghy (2022), a secagem é um dos processos mais utilizados na preservação de plantas medicinais e alimentícias. Consiste na remoção da umidade do material vegetal, inibindo a ação de microrganismos e enzimas que promovem a deterioração.

A escolha do método de secagem influencia diretamente na qualidade, no rendimento e na composição fitoquímica da planta (Elgamal et al., 2023). Entre os métodos convencionais, destaca-se a secagem ao ar livre ou à sombra, que, embora seja de baixo custo, pode apresentar limitações como contaminação por

poeira, microrganismos e exposição prolongada ao oxigênio, além de ser um processo que demanda dias para chegar ao teor de umidade desejado.

A secagem em estufa, por sua vez, permite controle de temperatura e tempo, sendo mais eficiente, mas podendo causar degradação térmica de compostos sensíveis (Alvarenga, 2020). Babaei Rad et al. (2025) descobriram que a secagem modificada dos produtos conhecidos como caper berries ou pepinos-de-alcaparra, que envolve secagem em baixa temperatura por períodos de tempo mais curtos, é mais bem-sucedida do que a secagem por ar quente (em mesmo tempo e temperatura) quando se determinam a cor, os compostos fenólicos totais, a atividade antioxidante e os níveis de vitamina C.

Conforme Ribeiro (2004), a liofilização é considerada uma das técnicas mais eficazes na preservação de compostos bioativos. Esse método utiliza o congelamento do material, seguido de sublimação da água sob vácuo, evitando o aquecimento excessivo. Por isso, é altamente recomendada para materiais ricos em substâncias voláteis ou termolábeis.

Uma alternativa que vem sendo estudada é a secagem por micro-ondas, que reduz drasticamente o tempo de processamento e pode preservar certos compostos mais eficientemente do que métodos térmicos convencionais. No entanto, o controle inadequado do tempo e da potência pode gerar pontos de superaquecimento e degradar bioativos (Dehghannya e Habibi-Ghods, 2025).

A comparação entre diferentes métodos de secagem é fundamental para estabelecer a melhor estratégia de conservação das propriedades nutraceuticas de plantas como a capuchinha. Cada técnica oferece vantagens e desvantagens, e a escolha ideal dependerá do objetivo final do uso do material vegetal.

4.1 Secagem Natural (à Sombra ou ao Sol)

A secagem natural é um dos métodos mais antigos e simples, sendo realizada ao ar livre, com exposição direta ao sol ou à sombra. É uma técnica de baixo custo, frequentemente utilizada em pequenas produções ou em comunidades tradicionais. No entanto, o tempo prolongado necessário para a secagem pode favorecer o crescimento microbiano e a oxidação de compostos sensíveis (Souza, 2020).

Alguns pontos positivos devem ser analisados em processos de secagem natural, como as condições ambientais ideais (ventilação, temperatura, umidade), que descrevem o que é necessário para que a secagem natural ocorra de forma eficaz, como um local arejado, seco, protegido da chuva e da luz solar direta (no caso da secagem à sombra). Tais condições influenciam diretamente o tempo de secagem e a preservação dos compostos bioativos. A influência da luz solar pode degradar compostos sensíveis, como alguns flavonoides e pigmentos, ou seja, a exposição direta ao sol pode reduzir a qualidade nutracêuticas da planta. A secagem natural permanece vantajosa em contextos de baixo custo energético e quando se pretende preservar compostos extremamente voláteis, desde que haja condições adequadas de higiene e ventilação. Contudo, o método apresenta elevada variabilidade decorrente de fatores climáticos e risco de contaminação ambiental (Calín-Sánchez et al., 2025).

4.2 Secagem em Estufa

A secagem em estufa constitui um método amplamente empregado em estudos fitoquímicos e no processamento de materiais biológicos devido ao maior controle das variáveis térmicas e temporais. Esse controle favorece uma desidratação homogênea, com menor exposição do material às condições ambientais externas, reduzindo contaminações e variações associadas à umidade relativa e temperatura ambiente. Em comparação à secagem natural, a utilização de estufas pode preservar de forma mais eficiente determinados compostos ativos, especialmente quando são adotadas temperaturas moderadas (Souza, 2020).

Entretanto, o processo térmico apresenta limitações importantes. O aumento da temperatura pode resultar na degradação de substâncias termossensíveis, como certos flavonoides, compostos fenólicos totais, vitamina C e componentes voláteis de óleos essenciais, exigindo seleção criteriosa dos parâmetros operacionais (Arslan e Alibas, 2024). Temperaturas entre 30°C e 60°C são comumente utilizadas na secagem de materiais vegetais em estufa. Níveis inferiores tendem a preservar compostos voláteis e estruturas

termolábeis, embora prolonguem o tempo necessário para remoção da umidade. Em contrapartida, temperaturas mais elevadas aceleram a taxa de evaporação, mas potencializam reações de oxidação, hidrólise e degradação térmica, afetando negativamente compostos bioativos sensíveis ao calor (Elgamal et al., 2023).

A degradação de compostos voláteis, como monoterpenos e sesquiterpenos presentes em óleos essenciais, representa uma das principais limitações do uso de temperaturas elevadas. Flavonoides e outros metabólitos secundários também podem sofrer alterações estruturais devido à oxidação ou ruptura térmica. Para minimizar essas perdas, recomenda-se utilizar temperaturas mais baixas, reduzir o tempo de exposição e, quando possível, adotar técnicas complementares, como pré-tratamentos físicos e controle rigoroso da circulação de ar na estufa (Masyita et al., 2022).

4.3 Liofilização (Secagem por sublimação)

A liofilização é um método moderno e eficaz para a preservação de compostos bioativos, sendo ideal para materiais termolábeis. Envolve o congelamento do produto e a remoção da água por sublimação em ambiente de vácuo. Esse processo preserva a estrutura celular e os compostos químicos, mas é de alto custo e requer equipamentos específicos (Borguini, 2018).

Durante a liofilização, a água presente no material vegetal é congelada e posteriormente, em ambiente de baixa pressão, convertida diretamente do estado sólido para o gasoso, fenômeno denominado sublimação. A combinação de temperaturas reduzidas e vácuo evita transições de fase que poderiam provocar colapso estrutural, desnaturação de biomoléculas ou reações de degradação térmica, preservando os componentes celulares sensíveis (Bhatta et al., 2020).

Uma das principais vantagens da liofilização é sua capacidade de preservar antioxidantes, vitaminas e metabólitos secundários voláteis, frequentemente degradados por métodos térmicos convencionais. Compostos como vitamina C, carotenoides, flavonoides e óleos essenciais mantêm-se mais estáveis quando submetidos à remoção de água em baixas temperaturas,

resultando em produtos com maior atividade biológica e melhor composição fitoquímica (Nakra et al., 2025).

A elevada estabilidade dos princípios ativos obtidos pela liofilização torna esse método amplamente adotado nos setores farmacêutico, cosmético e nutracêutico. Extratos vegetais liofilizados são utilizados em formulações que demandam prolongada vida útil, pureza elevada e preservação do perfil fitoquímico, demonstrando seu potencial de aplicação em produtos derivados de espécies como a *T. majus*, cujos compostos bioativos são sensíveis ao calor (Postružnik, et al., 2024).

4.4 Secagem por Micro-ondas

A secagem por micro-ondas utiliza radiação eletromagnética para aquecer a água dentro do material vegetal, acelerando o processo de secagem. É uma técnica rápida e eficiente, com potencial para preservar alguns compostos bioativos, mas requer cuidados quanto à homogeneidade do aquecimento para evitar a degradação térmica localizada (Borguini, 2018).

O processo de secagem por micro-ondas fundamenta-se na interação da radiação eletromagnética com as moléculas de água presentes no tecido vegetal. As micro-ondas promovem a agitação dipolar da água, resultando em aquecimento volumétrico rápido e eficiente. O aquecimento volumétrico uniforme na secagem por micro-ondas preserva o conteúdo bioquímico (Behera e Balasubramanian, 2025). Esse tipo de aquecimento interno exige controle rigoroso da potência aplicada, uma vez que níveis excessivos de energia podem induzir degradação térmica de compostos bioativos sensíveis (Tomas-Egea et al., 2021).

Uma das principais vantagens da secagem por micro-ondas consiste no tempo significativamente reduzido de desidratação, uma vez que o calor é gerado diretamente no interior da matriz vegetal. Essa rapidez diminui a exposição prolongada ao calor, contribuindo para a preservação de metabólitos termolábeis, como compostos fenólicos, vitaminas e certos constituintes voláteis (Ozdemir e Karagoz, 2024).

Apesar de sua eficiência, o método apresenta limitações relacionadas à formação de *hotspots*, regiões de aquecimento localizado que podem surgir quando o material é heterogêneo ou quando a potência das micro-ondas é inadequadamente ajustada. Esses pontos de superaquecimento podem provocar carbonização parcial, perda de massa vegetal e degradação de compostos químicos, comprometendo a qualidade do produto final (Priecel e Lopez-Sanchez, 2018).

Tendências recentes apontam para o uso de sistemas híbridos, como a secagem por micro-ondas associada ao vácuo, que permite reduzir a temperatura de ebulição da água e, conseqüentemente, minimizar danos térmicos. Essa abordagem otimiza a transferência de massa, acelera a secagem e preserva de forma mais eficaz compostos bioativos sensíveis, resultando em produtos de maior estabilidade física e química (Dehghannya e Habibi-Ghods, 2025; Pateiro et al., 2022).

5 INFLUÊNCIA DA SECAGEM NAS PROPRIEDADES FITOQUÍMICAS

Segundo Costa (2020), o processo de secagem pode provocar modificações significativas na composição química das plantas. A exposição ao calor, à luz e ao oxigênio durante o processo pode causar degradação de compostos bioativos, principalmente os antioxidantes e vitaminas. Por isso, o estudo da influência dos diferentes métodos de secagem é fundamental para a qualidade final do produto.

A oxidação é uma das principais reações químicas que ocorrem durante a secagem, especialmente em métodos que utilizam altas temperaturas. Compostos fenólicos, por exemplo, são altamente suscetíveis à oxidação, o que reduz sua capacidade antioxidante e, conseqüentemente, o potencial nutracêutico do material (Silva, 2018).

A perda de compostos voláteis e a modificação de pigmentos também são observadas em processos de secagem inadequados. Isso pode alterar não só as propriedades funcionais, mas também as características sensoriais da planta, como aroma, cor e sabor, que são importantes para a aceitabilidade pelo consumidor (Souza, 2020).

Conforme Gonçalves (2019), em contrapartida, métodos como a liofilização têm mostrado melhores resultados na manutenção de compostos antioxidantes e flavonoides, preservando as características da matriz vegetal. A baixa temperatura e a ausência de oxigênio minimizam as reações de degradação química, fazendo dessa técnica uma referência para comparação.

Dessa forma, entender como cada método de secagem afeta a composição fitoquímica da capuchinha é essencial para maximizar seu aproveitamento como alimento funcional. Os resultados dessas comparações podem embasar recomendações técnicas e práticas agrícolas e industriais mais eficientes.

Alguns trabalhos publicados de secagem na literatura secam diferentes flores (califórnia, camomila e capuchinha) e as comparam em termos de extrato, sem secagem (Hegde et al., 2023; Rodhen, 2023). Alvarenga (2020) realizou uma mistura de maracujá e capuchinha como bebida e analisou a pasteurização e esterilização (UHT) sobre o extrato. Eles observaram uma perda de aproximadamente 30% no teor de carotenoides.

Borguini (2018) analisou secagem de flores de diferentes cores da *T. majus* por liofilização e encontrou que as flores são fonte de carotenoides (882 – 4.152 µg/g), além de apresentarem luteína (598-2.440 µg/g), zeaxantina (49,93 – 417 µg/g), β-critoxantina e β-caroteno também foram encontrados em baixas concentrações. Este estudo traz que *T. majus* de flor amarela tem os maiores valores de compostos bioativos importantes para saúde, quando comparados as de cores laranja e vermelho, respectivamente.

Sahin et al. (2018) avaliou a secagem de *T. majus* por secagem convectiva com ar quente e micro-ondas, considerando cinética das mudanças de cor e a atividade da água. Eles perceberam que em todas as temperaturas utilizadas em ambos os métodos alteraram os três parâmetros de cor (L^* , a^* , b^*) e causaram diminuição nos valores de atividade da água.

Borguini et al. (2016) secou flores da capuchinha e observou que, na liofilização, houve uma retenção de 71% dos carotenoides na flor laranja, valor que caiu para 53% em temperatura ambiente e 47% em estufa. Fabián et al. (2017) avaliaram a secagem por *spray dryer* de flores de capuchinha amarela (*Tropaeolum majus* L.), utilizando maltodextrina e goma arábica como agentes

carreadores. Os autores observaram porcentagens de recuperação de 74,10% e 83,76% nas temperaturas de 130 °C e 150 °C, respectivamente, quando utilizada a goma arábica. Também foram observadas diferenças significativas no teor de umidade, higroscopicidade, densidade aparente e rendimento, enquanto não foram observadas diferenças significativas na atividade antioxidante e na solubilidade. Esses resultados demonstram a aplicabilidade da secagem por *spray dryer* para a obtenção de produtos em pó a partir da capuchinha, embora o estudo tenha sido direcionado à microencapsulação de carotenoides utilizando agentes carreadores (Fabián et al., 2017).

Apesar da aplicação do *spray dryer* à capuchinha já ter sido relatada, os estudos encontrados concentram-se principalmente na obtenção de produtos microencapsulados e na avaliação de carotenoides, utilizando agentes carreadores. Dessa forma, permanece relevante ampliar o conhecimento sobre a secagem por *spray dryer* de extratos de capuchinha, especialmente considerando a influência de diferentes condições operacionais sobre características físico-químicas, propriedades tecnológicas e diferentes classes de compostos bioativos. Nesse contexto, o capítulo dois do presente trabalho buscou avaliar a influência da temperatura do ar de secagem, da vazão de alimentação e da vazão de ar sobre as características dos pós obtidos a partir das folhas de capuchinha.

6 POTENCIAL DE APLICAÇÃO DA CAPUCHINHA NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA E FITOTERÁPICA

Os alimentos funcionais são caracterizados como matrizes alimentares ou ingredientes que, além de suprirem as necessidades nutricionais básicas, demonstram a capacidade de produzir efeitos metabólicos ou fisiológicos benéficos à saúde quando integrados à dieta habitual. No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária estabelece que a alegação de propriedade funcional está vinculada ao papel que um nutriente ou não nutriente desempenha na manutenção de funções normais do organismo humano (Brasil, 1999). Diferente dos medicamentos, esses alimentos devem ser consumidos como

parte de um regime alimentar equilibrado para auxiliar na redução do risco de doenças crônicas (Souza et al., 2023).

Segundo Costa (2020), a capuchinha tem despertado crescente interesse da indústria de alimentos e fitoterápicos, devido ao seu perfil fitoquímico e à possibilidade de ser utilizada em diversas formas, como extratos, cápsulas, chás, suplementos e ingredientes culinários. Sua versatilidade permite que seja aplicada tanto em produtos frescos quanto desidratados.

Na indústria alimentícia, a capuchinha pode ser incorporada em saladas, molhos, condimentos e bebidas funcionais. Seu sabor picante e sua coloração atrativa favorecem sua aceitação pelo consumidor, ao mesmo tempo em que oferece benefícios à saúde. A inclusão de ingredientes com apelo natural e funcional tem sido uma tendência no desenvolvimento de novos produtos (Gouveia, 2018).

De acordo com Liberato (2019), já na área fitoterápica, os extratos da capuchinha têm sido estudados como alternativas para o desenvolvimento de medicamentos naturais e cosméticos, graças às suas propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias e antioxidantes. A padronização desses extratos, no entanto, depende de métodos de processamento que preservem os compostos bioativos em concentrações adequadas.

A estabilidade dos compostos nutracêuticos durante o armazenamento também é influenciada pelo método de secagem. Produtos mal processados perdem sua eficácia ao longo do tempo, o que compromete sua aplicabilidade industrial. Por isso, conhecer as melhores técnicas de secagem permite ampliar a vida útil e garantir a eficácia dos produtos derivados da capuchinha (Gonçalves, 2019).

Diante disso, a definição do método de secagem mais adequado torna-se estratégica para a valorização da capuchinha como recurso biotecnológico. Essa valorização pode impulsionar cadeias produtivas sustentáveis, fomentando o uso racional da biodiversidade brasileira e promovendo inovação na produção de alimentos e medicamentos à base de plantas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transformação da capuchinha em pó, viabilizada por diferentes métodos de desidratação, amplia significativamente sua aplicabilidade industrial ao garantir estabilidade microbiológica e concentrar seus princípios ativos. Este estudo mostrou que, embora a secagem convencional em estufa possa causar degradação térmica de pigmentos, métodos como a liofilização, preservam a integridade de compostos termossensíveis, resultando em um insumo de alta solubilidade e cor intensa. Mais recentemente, a utilização do *spray dryer* tem se destacado na literatura por permitir o microencapsulamento do extrato da planta, protegendo a luteína contra a oxidação e facilitando sua incorporação como corante natural e fortificante em matrizes alimentícias sólidas e líquidas, como massas, produtos de panificação e bebidas instantâneas. Assim, o pó da capuchinha deixa de ser apenas um condimento doméstico para se tornar um ingrediente funcional tecnológico de alto valor agregado.

A capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) apresenta potencial em compostos bioativos com diversas propriedades. O método de secagem, quando bem escolhido pode preservar estes compostos ou ocasionar perdas mínimas. Assim, a secagem da capuchinha pode ser promissora para aumentar a vida útil da planta e suas substâncias nutraceuticas.

8 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, G. F. et al. **Blend de maracujá e capuchinha: efeito do processamento térmico sobre compostos bioativos e características sensoriais.** *Brazilian Journal of Food Research*, v. 9, n. 3, p. 1–12, 2020.

ARAÚJO, V. de O. et al. **90-Day oral toxicity assessment of *Tropaeolum majus* L. in rodents and lagomorphs.** *Journal of Medicinal Food*, v. 21, n. 8, p. 823-831, 2018. DOI: 10.1089/jmf.2017.0128. <https://doi.org/10.1089/jmf.2017.0128>

ARSLAN, A, ALIBAŞ, I. **Assessing the effects of different drying methods and minimal processing on the sustainability of the organic food quality.** *Innovative, Food Science & Emerging Technologies*, v. 94, 2024. Doi: 10.1016/j.ifset.2024.103681. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103681>

BABAEI RAD S, MUMIVAND H, MOLLAEI S, KHADIVI A. **Effect of drying methods on phenolic compounds and antioxidant activity of Capparis spinosa L. fruits.** BMC Plant Biology, v.25, 1, 133, 2025. Doi: 10.1186/s12870-025-06110-y. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06110-y>

BEHERA, B, BALASUBRAMANIAN, P. **Experimental and modelling studies of convective and microwave drying kinetics for microalgae.** Bioresource Technology, v. 340, 2021. Doi: 10.1016/j.biortech.2021.125721. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125721>

BORGUINI, R. G. et al. **Flores de capuchinha: uma hortaliça não-convencional rica em carotenoides.** Rio de Janeiro: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2016. 4 p. (Comunicado Técnico, 222).

BORGUINI, R G. et al. **Flores de capuchinha: uma hortaliça não-convencional rica em carotenoides.** Brasília, DF: *Embrapa Agroindústria de Alimentos*; Embrapa Hortaliças, 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 18, de 30 de abril de 1999.** Aprova o Regulamento Técnico que estabelece as diretrizes básicas para análise e comprovação de propriedades funcionais e/ou de saúde alegadas na rotulagem de alimentos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 11, 3 maio 1999.

BRONDANI, J. C. et al. **Traditional usages, botany, phytochemistry, biological activity and toxicology of Tropaeolum majus L.** Revista Brasileira de Farmacognosia, v. 26, n. 3, p. 368-377, 2016.x

CALÍN-SÁNCHEZ Á, LIPAN L, CANO-LAMADRID M, KHARAGHANI A, MASZTALERZ K, CARBONELL-BARRACHINA ÁA, FIGIEL A. **Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs.** Foods, Sep 9;9(9):1261, 2020. Doi: 10.3390/foods9091261. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>

COSTA, L. C.; RIBEIRO, W. S.; BARBOSA, J. A. **Compostos bioativos e alegações de potencial antioxidante de flores de maracujá, cravo amarelo, rosa e capuchinha.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 16, n. 3, p. 279–289, 2020. <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v16n3p279-289>

COSTA, M. C. A. **Viabilidade técnica do cultivo protegido e orgânico de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) em consórcio com hortaliças convencionais.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília.

DEHGHANNYA, J, HABIBI-GHODS, M. **Microwave Drying of Food Materials: Principles, Hybrid Techniques, Modeling Approaches, and Emerging Innovations** *Comprehensive review and food science and food safety*, 2025. Doi: 10.1111/1541-4337.70312. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70312>

DURAN, C. et al. **Produção de flores e crescimento radicular da *Tropaeolum majus* L. subirrigada.** *Revista de Ciências Agrárias*, v. 45, n. 1-2, 2022. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/19719>. Acesso em: 14 abr. 2025.

EBERT, Elizandra Fátima; SIVINSKI, Eduardo Alexandre; PELISSER, Crivian; ENDRES, Creciana Maria; MATTIA, Jaqueline Lidório de. **Capuchinha (*Tropaeolum majus*): compostos bioativos e sua funcionalidade no organismo.** *Research, Society and Development*, v. 10, n. 16, e05101622623, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.22623>

EGEA, M B, LEMES, A C. **Understanding the potential of *Tropaeolum majus*, a non-conventional food plant, in lipid and glucose metabolism.** *PharmaNutrition*, v. 34, 2025. Doi: 10.1016/j.phanu.2025.100455. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2025.100455>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Capuchinha. Corumbá:** Embrapa Pantanal, 2006. (Série Plantas Medicinais, Condimentares e Aromáticas).

FABIÁN, L. J. et al. **Evaluación de la estabilidad de carotenoides y actividad antioxidante de la flor de mastuerzo (*Tropaeolum majus* L.) en la microencapsulación por spray-drying.** *Revista de la Sociedad Química del Perú, Lima*, v. 83, n. 3, p. 282–293, 2017. DOI: 10.37761/rsqp.v83i3.112. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i3.112>

GONÇALVES, J.; SILVA, G. C. O.; CARLOS, L. A. **Compostos bioativos em flores comestíveis: perspectivas.** *Biológicas & Saúde*, v. 9, n. 2, p. 11–20, 2019. DOI: 10.25242/886892920191719. [RSD Journal. https://doi.org/10.25242/886892920191719](https://doi.org/10.25242/886892920191719)

GOUVEIA, I. P.; SOUZA, N. S. **Capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) e efeitos promissores na síndrome metabólica: evidências preliminares.** *Revista Brasileira de Nutrição Funcional*, edição 75, p. 18–21, 2018. [RSD Journal](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.22623)

LIBERATO, P. S.; LIMA, D. V. T.; SILVA, G. M. B. **PANCs - Plantas Alimentícias não Convencionais e seus benefícios nutricionais.** *Environmental Smoke*, v. 2, n. 2, p. 102–111, 2019. <https://doi.org/10.32435/envsmoke.201922102-111>

LIMA, Isadora Cardoso e; BOTREL, Neide; VILAS BOAS, Eduardo Valério de Barros; MADEIRA, Nuno Rodrigo; MELO, Raphael Augusto de Castro e. **Caracterização de flores da capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) armazenadas em diferentes temperaturas.** São José do Rio Preto, SP: Universidade Estadual Paulista, 2016.

MASYITA A, MUSTIKA SARI R, DWI ASTUTI A, YASIR B, RAHMA RUMATA N, EMRAN TB, NAINU F, SIMAL-GANDARA J. **Terpenes and terpenoids as main bioactive compounds of essential oils, their roles in human health and potential application as natural food preservatives.** *Food Chemistry*, Jan 19;13:100217, 2022. Doi: 10.1016/j.fochx.2022.100217. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100217>

MAZZINGHY, A. C. C. et al. **Investigação do perfil químico e da atividade antioxidante de folhas de *Tropaeolum majus* L.** In: V CONGRESSO SUL-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2022. <https://doi.org/10.29327/164256.1-3>

MORAES, F. P.; COLLA, L. M. **Alimentos funcionais e nutraceuticos: definições, legislação e benefícios à saúde.** *Revista Eletrônica de Farmácia*, Goiânia, v. 3, n. 2, p. 99-112, 2006. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/ref/article/view/2082>. Acesso em: 07 jan. 2026. <https://doi.org/10.5216/ref.v3i2.2082>

NAKRA, S, TRIPATHY, S, SRIVASTAV, P P. **Drying as a preservation strategy for medicinal plants: Physicochemical and functional outcomes for food and human health.** *Phytomedicine Plus*, v. 5, Issue 2, 2025. Doi: 10.1016/j.phyplu.2025.100762. <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2025.100762>

NUNES, G. et al. **Otimização do processo de extração de compostos bioativos das folhas de capuchinha (*Tropaeolum majus*).** In: WEB ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2023.

PATEIRO, M, VARGAS-RAMELLA, M, FRANCO, D, CRUZ, A G, ZENGİN, G, KUMAR, M, DHAMA, K, LORENZO, J M. **The role of emerging technologies in the dehydration of berries: Quality, bioactive compounds, and shelf life.** *Food Chemistry: X*, v. 16, 2022. Doi: 10.1016/j.fochx.2022.100465. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100465>

PLATZ, S. et al. **Bioavailability and metabolism of benzyl glucosinolate in humans consuming Indian cress (*Tropaeolum majus* L.).** *Molecular Nutrition & Food Research*, v. 60, n. 3, p. 652-660, 2016. DOI: 10.1002/mnfr.201500633. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201500633>

PRIECEL, P, LOPEZ-SANCHEZ, J A. **Advantages and Limitations of Microwave Reactors: From Chemical Synthesis to the Catalytic Valorization of Biobased Chemicals.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7 (1), 3-21, 2019. Doi: 10.1021/acssuschemeng.8b03286. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03286>

POSTRUŽNIK, V, STAJČIĆ, S, BORJAN, D, ĆETKOVIĆ, G, KNEZ, Ž, KNEZ MAREVCI, M, VULIĆ, J. (2024). **Impact of Storage Conditions on Stability of Bioactive Compounds and Bioactivity of Beetroot Extract and Encapsulates.** *Processes*, 12(7), 1345, 2024. Doi: 10.3390/pr12071345. <https://doi.org/10.3390/pr12071345>

RHODEN, S. L. et al. **Estudo fitoquímico do extrato etanólico de variedades de flores da *Tropaeolum majus* L.** In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2023.

RIBEIRO JUNIOR, J. I. et al. **Produção da capuchinha em cultivo solteiro e consorciado com os repolhos verde e roxo sob dois arranjos de plantas.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 28, n. 4, p. 840–846, 2004.

SANGALLI, A.; VIEIRA, M. C.; HEREDIA ZÁRATE, N. A. **Resíduos orgânicos e nitrogênio na produção de biomassa da capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) 'Jewel'.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 28, n. 4, p. 831–839, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542004000400015>

SANTANA, A. S. et al. **Microencapsulation of bioactive compounds from edible flowers: a review.** *International Journal of Food Science & Technology*, 2020.

SANTOS, J. H. S. et al. **Desenvolvimento de mudas de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) em diferentes composições de substratos utilizando compostos orgânicos e minerais.** In: ANAIS DO XXII ENEPET, 2023.

SCHIESS, S. et al. **Oral administration of nasturtium affects peptide YY secretion in male subjects.** *Molecular Nutrition & Food Research*, v. 61, n. 8, 1600886, 2017. DOI: 10.1002/mnfr.201600886. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201600886>

SILVA JUNIOR, J. B. et al. **Produção de flores de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) submetida ao manejo orgânico em condições da Baixada Fluminense.** *Embrapa Agrobiologia*, 2018.

SILVA, Francisca Pereira da. **Adubação orgânica e mineral no crescimento e microrganismos da rizosfera de capuchinha.** 2024. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, Pombal, PB, 2024.

SILVA, P. G. da et al. **Germinação e crescimento inicial de capuchinha em diferentes condições de cultivo.** *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 13, n. 5, 2018. DOI: 10.33240/rba.v13i5.22712. <https://doi.org/10.33240/rba.v13i5.22712>

SOUZA, A. C. S. et al. **Alimentos funcionais e saúde – uma revisão.** *PublicaIFRS*, Bento Gonçalves, v. 4, n. 1, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ifrs.edu.br/index.php/publicaifrs/article/view/6378>. Acesso em: 07 jan. 2026.

SOUZA, H. de A.; NASCIMENTO, A. L. A. A.; STRINGHETA, P. C.; BARROS, F. **Capacidade antioxidante de flores de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.).** *Revista Ponto de Vista*, v. 9, n. 1, p. 73–84, 2020. DOI: 10.47328/rpv.v9i1.9632. <https://doi.org/10.47328/rpv.v9i1.9632>

SOUZA, Harícia de Almeida; NASCIMENTO, Amanda Laís Alves Almeida; STRINGHETA, Paulo César; BARROS, Frederico Augusto Ribeiro de. **Capacidade antioxidante de flores de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.).** *Revista Ponto de Vista*, v. 1, n. 9, p. 73, 2020. <https://doi.org/10.47328/rpv.v9i1.9632>

TRAESEL, G. K. et al. **Safety assessment and botanical standardization of an edible species from South America.** *Journal of Medicinal Food*, v. 20, n. 5, 2017. DOI: 10.1089/jmf.2016.0143. <https://doi.org/10.1089/jmf.2016.0143>

TOMAS-EGEA, J A, TRAFFANO-SCHIFFO, M V, CASTRO-GIRALDEZ, M, FITO, P J. **Hot Air and Microwave Combined Drying of Potato Monitored by Infrared Thermography.** *Applied Science*, 11, 2021. Doi: 10.3390/app11041730. <https://doi.org/10.3390/app11041730>

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS DAS FOLHAS DA CAPUCHINHA APÓS SECAGEM EM *SPRAY DRYER*.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da secagem por *spray dryer* sobre as propriedades físico-químicas e os compostos bioativos das folhas de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.), utilizando planejamento experimental para analisar a influência da temperatura do ar de secagem, da vazão de alimentação e da vazão de ar. A composição centesimal das folhas *in natura* foi determinada e os pós obtidos foram caracterizados quanto à umidade, atividade de água, cor, higroscopicidade, densidade bulk, rendimento, tempo de molhamento, clorofila total, carotenoides e compostos fenólicos totais. As folhas frescas apresentaram elevado teor de umidade (81,97%), além de expressivos teores de proteína, fibra bruta e cinzas em base seca, evidenciando seu potencial nutricional. A secagem por *spray dryer* mostrou-se eficiente na redução da umidade, sendo obtidos pós com valores entre 5,58 e 7,87%. A atividade de água permaneceu abaixo de 0,300 em todas as condições avaliadas, indicando condições favoráveis à estabilidade do produto. Os parâmetros de processo influenciaram significativamente diferentes propriedades dos pós, destacando-se a temperatura como fator determinante para a preservação dos pigmentos e a obtenção do rendimento. O maior rendimento foi de 56,96%, obtido a 140 °C, com vazão de alimentação de 0,40 L·h⁻¹ e vazão de ar de 1,60 m³·min⁻¹. Entretanto, a condição de 100 °C, 0,40 L·h⁻¹ e 1,60 m³·min⁻¹ apresentou o melhor desempenho quanto à preservação dos compostos bioativos, com 1500,75 mg·100 g⁻¹ de clorofila total, 39,93 mg·100 g⁻¹ de carotenoides e elevado teor de compostos fenólicos totais. Além disso, as menores temperaturas de secagem favoreceram menores tempos de molhamento, indicando melhores propriedades de reconstituição do pó. Dessa forma, dentro das condições avaliadas, o emprego de temperaturas moderadas mostrou-se mais adequado para preservar o potencial nutracêutico da capuchinha, enquanto temperaturas mais elevadas favoreceram o rendimento do processo. Os resultados demonstram o potencial do *spray dryer* para a obtenção de um ingrediente em pó de capuchinha com maior estabilidade e possibilidade de aplicação em produtos alimentícios e nutracêuticos.

Palavras-chave: Plantas não convencionais. Secagem. Temperatura.

1 INTRODUÇÃO

A capuchinha, também conhecida como “chaguinha” (*Tropaeolum majus* L.), é uma planta herbácea de flores vistosas, pertencente à família *Tropaeolaceae*, classificada como plantas alimentícias não convencionais (PANC). Originária da América do Sul, suas flores exibem diversas cores (amarelas, alaranjadas e vermelhas), e suas folhas são redondas e planas, sendo utilizadas em uma variedade de aplicações (Sartori et al., 2020). Além de serem visualmente atraentes como flores ornamentais, as flores da capuchinha são bem aceitas sensorialmente e proporcionam benefícios à saúde devido à presença de compostos bioativos antioxidantes. Esses compostos não só contribuem para a saúde e o bem-estar geral, mas também podem auxiliar na prevenção de doenças crônicas não transmissíveis, bem como na proteção contra a degeneração macular e distúrbios imunológicos (Ebert et al., 2021). A capuchinha também é empregada na medicina popular como expectorante, antidiabético, anti-inflamatório e calmante natural, devido às suas propriedades hipotensoras (Barrantes-Martínez et al., 2022).

Nas últimas décadas, observa-se um crescimento expressivo no interesse por alimentos funcionais e por plantas com propriedades medicinais, impulsionado pela busca por uma alimentação mais saudável, diversificada e de alto valor nutricional, aliada a uma maior consciência ambiental (Durazzo et al., 2019). Nesse contexto, as Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC), como a capuchinha (*Tropaeolum majus* L.), têm despertado atenção devido ao seu perfil de compostos bioativos, sendo uma fonte rica em fenólicos totais, flavonoides e, notavelmente, carotenoides (Mattia et al., 2021). Estes princípios ativos conferem às capuchinhas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (Bressan, V. 2025). Em particular, o alto teor de luteína e zeaxantina estão associados à prevenção de doenças oculares (Rodriguez-Amaya & Niizu, 2005), destacando-se assim, seu valor como alimento funcional.

Além das flores, as folhas da capuchinha têm um sabor picante e são ricas em compostos bioativos, como o β -caroteno, que é precursor da vitamina A, e a luteína, conhecida por sua contribuição na prevenção da degeneração macular (Niizu; Rodriguez-Amaya, 2005). Adicionalmente, foram identificados nas folhas da capuchinha os flavonoides isoquercitina, quercetina, kaempferol e isoramnetina, além do ácido cafeico (Mazzinghy et al., 2022). Os botões florais e os frutos da capuchinha, quando em conserva, têm um sabor reminiscente ao da alcaparra. Hoje em dia, é

frequentemente utilizada por restaurantes que a incluem em saladas frescas, nutritivas e visualmente atraentes. As flores comestíveis são seguras para consumo humano e oferecem muitas possibilidades na culinária (Ribeiro et al., 2011).

Devido ao alto teor de umidade da capuchinha (*in natura*), a estabilidade e a vida de prateleira são severamente limitadas (umidade: $81,97 \pm 0,15\%$ b.u.). A técnica de secagem por atomização (*spray dryer*) pode ser uma escolha metodológica eficaz por sua capacidade de transformar o extrato em pó, que é de fácil manuseio e incorporação. O processo é caracterizado por um tempo de contato curto e temperaturas controladas, o que é crucial para minimizar a degradação térmica de compostos altamente sensíveis, como os carotenoides, e garantir a máxima retenção de bioativos e a estabilidade da cor (Garzón & Wrolstad, 2009).

Embora o perfil funcional e nutricional da capuchinha seja reconhecido na literatura (Souza et al., 2020), as pesquisas envolvendo a secagem por atomização da cultura mantêm-se restritas, em sua maioria, ao aproveitamento de suas flores e com o emprego obrigatório de agentes carreadores. Nota-se a ausência de estudos que avaliem, mediante planejamento experimental, o efeito conjunto da temperatura do ar de entrada, da vazão de alimentação e da vazão do ar de secagem sobre o rendimento, as propriedades tecnológicas e a retenção de pigmentos e compostos fenólicos no processamento do extrato de folhas. Ademais, a atomização sem a adição de adjuvantes de secagem representa uma abordagem ainda pouco explorada, na qual o comportamento de pegajosidade (*stickiness*) é governado exclusivamente pelos solutos nativos da planta. Diante dessa lacuna, o presente trabalho objetivou estudar o impacto dessas três variáveis de processo na secagem por *spray dryer* do extrato integral de folhas de capuchinha.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção da matéria prima

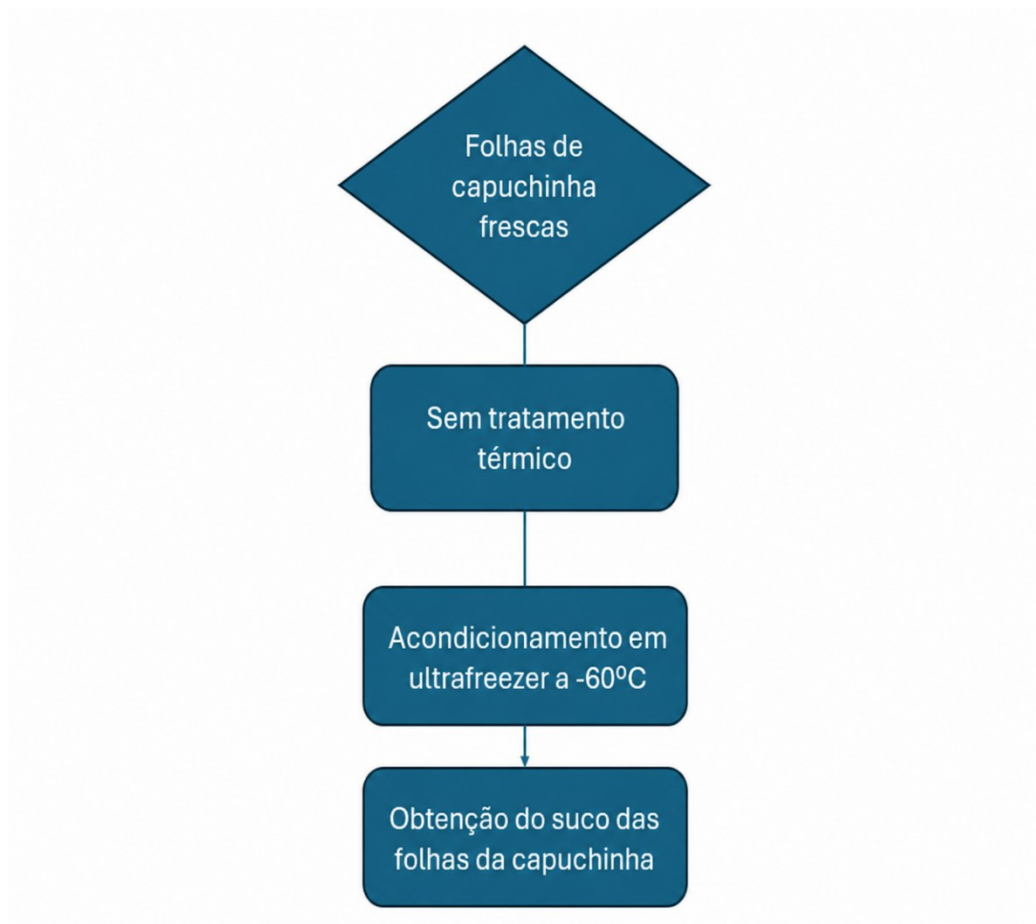
As folhas da capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) foram adquiridas comercialmente com um fornecedor/cultivador da cidade de Patos de Minas - MG. A seleção da matéria-prima foi realizada por inspeção visual, considerando aspectos como aparência, tamanho e estado de conservação, sendo que, as folhas do caule foram manualmente retiradas. Após a seleção, para o experimento de secagem, as

folhas de capuchinha foram acondicionadas em embalagens de polietileno transparente, cada pacote contendo aproximadamente 200 g, e estocadas em ultra freezer (Indrel, modelo IULT335D, Brasil) a -60°C.

2.2 Preparo das amostras

Na Figura 3 está apresentado um fluxograma com as etapas utilizadas no preparo das amostras da capuchinha que foram submetidas à secagem. Previamente à realização da secagem por atomização, as amostras das folhas da capuchinha, ainda congeladas, foram trituradas em liquidificador industrial, adicionando-se água na proporção de 1:3, em massa, de folhas de capuchinha, visando obter um extrato, conforme apresentado na figura 4. Em seguida, o extrato foi peneirado, em uma peneira de 16 mesh Tyler (1,00 mm) para a retirada de partículas maiores, sendo estas descartadas, uma vez que podem prejudicar o processo de secagem em *spray dryer* devido à possibilidade de entupimento do bico atomizador.

Figura 3 - Fluxograma do preparo das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 4 - Extrato de capuchinha preparado sem branqueamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.3 Obtenção do pó

A secagem por atomização foi realizada utilizando um *spray dryer* (LM MSD 1.0, LabMq, Brasil) com capacidade nominal de $1 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, instalado no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas. Na Figura 5 está apresentado o modelo de *spray dryer* que foi utilizado para a realização da secagem. O equipamento é essencialmente composto por: bico atomizador, entrada de ar (válvula) e solução, ciclone, câmara de secagem e exaustor.

Figura 5 - *Spray dryer* utilizado para a secagem de extrato da capuchinha, em que: (1 e 2) representam a localização do bico atomizador e a entrada de ar e solução; (3) o ciclone; (4) a câmara de secagem e (5) a exaustão de ar e partícula mais finas (não coletadas).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A etapa de branqueamento foi omitida no pré-tratamento da matéria-prima com o propósito de preservar a integridade de compostos bioativos termolábeis e evitar perdas de fitoquímicos por lixiviação. Ademais, a rápida remoção de água no processo de atomização assegura a estabilidade enzimática necessária. Os experimentos de

secagem foram realizados de acordo com a metodologia de planejamento fatorial de experimentos (Box, Hunter & Hunter, 2005) e, a matriz do planejamento está apresentada na Tabela 1. O efeito dos fatores foi investigado por meio de um planejamento fatorial completo em dois níveis com três variáveis (2^3). Testes foram realizados com bico atomizador de 1,2 mm de diâmetro, vazão do ar de atomização fixo em $40 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, sendo as variáveis independentes analisadas, temperatura do ar de secagem (100° a 140°C), vazão de alimentação ($0,40 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ e $0,80 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$), e vazão de ar de secagem ($1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ e $1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$). Estes intervalos experimentais foram definidos de acordo com a revisão da literatura e testes preliminares.

Tabela 1 - Planejamento Fatorial a dois níveis completo com 3 variáveis (2^3).

Experimentos	Temperatura ($^\circ\text{C}$) (X1)	V_{alim} ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$) (X2)	V_{ar} ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) (X3)
1	100 (-1)	0,40 (-1)	1,60 (-1)
2	100 (-1)	0,40 (-1)	1,85 (+1)
3	100 (-1)	0,80 (+1)	1,60 (-1)
4	100 (-1)	0,80 (+1)	1,85 (+1)
5	140 (+1)	0,40 (-1)	1,60 (-1)
6	140 (+1)	0,40 (-1)	1,85 (+1)
7	140 (+1)	0,80 (+1)	1,60 (-1)
8	140 (+1)	0,80 (+1)	1,85 (+1)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2026).

Em que, V_{alim} significa vazão de alimentação da solução no secador, V_{ar} significa vazão de alimentação de ar na câmara de secagem.

2.4 Caracterização físico-química das folhas frescas e do produto em pó

Com o intuito de verificar as propriedades das folhas de capuchinha, a presença de compostos bioativos e o efeito das variáveis sobre as características do material seco, análises físico-químicas foram realizadas. As folhas *in natura* (antes do processo de secagem) foram caracterizadas por meio das análises de cor, umidade, atividade de água, análise da composição centesimal, fenólicos, clorofila e carotenoides. Para as amostras secas foram realizadas análises de umidade, cor, higroscopicidade, fenólicos, clorofila, carotenoides totais, rendimento, atividade

água, densidade bulk e tempo de molhamento. Todas as análises foram feitas em triplicata e os procedimentos estão descritos nos próximos itens.

2.4.1 Determinação da Umidade

O teor de umidade das amostras foi determinado por método gravimétrico. 5g de amostra das folhas da capuchinha foram coletadas em cadinhos de porcelana de 25 mL, aquecidos previamente em estufa convectiva a 105°C por no mínimo 30 min, para eliminar umidade adsorvida e atingir massa constante, e resfriados em dessecadores até atingirem a temperatura ambiente. Na sequência, os cadinhos de porcelana contendo as amostras foram pesados em balança analítica (Shimadzu do Brasil, modelo AUW320, Brasil) e levados para a estufa convectiva a 105°C por 24 h. Após esse período, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores para resfriamento, e em seguida pesadas. O teor de umidade das amostras, em base úmida, foi calculado por meio da Equação 1.

$$X_u = \frac{M_s - M_{ss}}{M_s} \cdot 100 \quad (1)$$

em que X_u é a umidade do produto em base úmida (%), M_s é a massa de sólido úmido (sólidos e água) e M_{ss} é a massa de sólidos secos.

2.4.2 Determinação da atividade de água

A atividade de água (a_w) das amostras em pó de *Tropaeolum majus* L. foi determinada utilizando um analisador de ponto de orvalho PRE DEW (modelo Ponto de Orvalho, Brasil), baseado no princípio de medição por espelho resfriado. Esse método consiste na detecção óptica da temperatura exata em que ocorre a condensação da água presente no vapor em equilíbrio com a amostra, permitindo a determinação da atividade de água pela relação entre a pressão de vapor da amostra e a pressão de vapor da água pura.

As análises foram realizadas à temperatura controlada de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Aproximadamente 2 g de cada amostra foram transferidos para a câmara de medição previamente higienizada, aguardando-se o equilíbrio higroscópico até estabilização do sinal ($< \pm 0,001$). Todas as determinações foram realizadas em triplicata, e os valores finais foram expressos como média e desvio-padrão.

2.4.3 Determinação da cor

Para a análise colorimétrica das folhas frescas da capuchinha e das amostras dos pós, as leituras foram efetuadas com o uso do colorímetro de reflectância Delta Vista® 450G de geometria óptica 45/0° e brilho 60°, faixa espectral de 400 a 700 nm e resolução de 10 nm, área de medição de 16 mm, no parâmetro ΔE Lab, o que permitiu a avaliação dos parâmetros L^* (luminosidade), a^* (coordenada vermelho/verde) e b^* (coordenada amarelo/azul) tanto das folhas *in natura*, quanto dos pós. O equipamento foi calibrado de acordo com as especificações do fabricante, utilizando um padrão branco e preto para referência (fornecidos com o equipamento), a cada mudança de amostra. Para a medição, uma quantidade padronizada de folhas e pó foi colocada na câmara de leitura do colorímetro, e os valores de L^* , a^* , e b^* foram registrados. Foi executada a limpeza do compartimento de amostras após cada medição, evitando contaminação cruzada. Para cada amostra avaliada, foram efetuadas 3 medições. Para a avaliação da alteração de cor dos pós, os resultados foram submetidos ao cálculo da diferença total de cor (ΔE), segundo a Equação 2, em que as mudanças de cor podem ser medidas como o módulo do vetor de distância entre os valores de cor iniciais e as coordenadas de cores reais (Kumar et al., 2022; Pathare et al., 2013).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (2)$$

2.4.4 Determinação da concentração de clorofila total e carotenoides

O conteúdo de clorofila e carotenoides foi determinado por meio da metodologia de Arnon (1949), adaptada. Para determinação, foram colocados em tubos Falcon aproximadamente 0,1 g de capuchinha com adição de 10 ml de acetona 80%. Em seguida, a mistura foi agitada em vórtex por 1 min e em seguida levada ao banho ultrassônico por 5 min e centrifugada a 5.000 rpm por 10 min. Após a centrifugação, a clorofila presente no sobrenadante foi separada e transferida para um balão volumétrico de 50 ml. Em seguida, adicionou-se acetona 80% ao precipitado remanescente nos tubos, os quais foram submetidos a uma nova etapa de centrifugação. Posteriormente, foram realizadas as leituras de absorbância em espectrofotômetro (Modelo Espectrofotômetro UV-1280 UV-VIS-Shimadzu) em três comprimentos de onda: 480, 645 e 663 nm. Para as leituras foram adicionados 5 mL

de extrato e 10 mL de acetona 80%. A clorofila a, b e clorofila total foram calculadas utilizando as Equações 3, 4 e 5, propostas por Arnon (1949) e com os coeficientes de absorção propostos por Lichtenthaler (1987) e a obtenção de carotenoides pela Equação 6, os teores de clorofila e carotenoides expressos em $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de massa seca:

$$Ca = 12,7A_{663} - 2,69A_{645} \quad (3)$$

$$Cb = 22,9A_{645} - 4,68A_{663} \quad (4)$$

$$Ct = 20,2A_{645} + 8,02A_{663} \quad (5)$$

$$Cr = A_{480} + \left[(0,114A_{663}) - (0,638A_{645}) \cdot \frac{V}{(1000 \cdot W)} \right] \cdot 100 \quad (6)$$

sendo Ct : clorofila total; V : volume da amostra (ml); W : peso da amostra (g); Ca : clorofila a; Cb : clorofila b; e Cr : carotenoides.

2.4.5 Determinação da higroscopicidade

A higroscopicidade do produto seco foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Cai e Corke (2000), com algumas modificações, baseadas no estudo de Tonon et al. (2009). Foi colocado aproximadamente 1 g de cada amostra em cadinhos de alumínio aquecidos previamente em estufa convectiva (Nova Ética modelo 402-3D) a 105°C por no mínimo 30 min, e resfriados em dessecadores até atingirem a temperatura ambiente. Em seguida, foi colocado as amostras em um recipiente hermético (dessecador) contendo uma solução saturada de NaCl (umidade relativa de 75,29 %) a 25°C e, após uma semana (7 dias), as amostras foram pesadas e a higroscopicidade foi expressa como g de umidade adsorvida por 100 g de massa seca da amostra ($\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) e será calculada conforme apresentado na Equação 7:

$$H = \frac{(P_f - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (7)$$

em que, H representa a higroscopicidade (%); P_f é a massa final (após adsorção); P_s é a massa inicial da amostra (g).

2.4.6 Determinação da densidade bulk

A densidade bulk do leito de partículas dos pós de capuchinha obtidos a partir da secagem foi determinada vertendo-se aproximadamente 2 g do pó em uma proveta graduada (10 mL). Essa proveta foi repetidamente batida sobre uma superfície plana e com uma altura de aproximadamente 2 cm de altura, até que as diferenças desprezíveis entre as batidas sucessivas fossem observadas (Barbosa-Cánovas et al., 2005). Sabendo-se a massa da amostra adicionada à proveta, e o volume ocupado na proveta, foi calculada a densidade *bulk*, que foi expressa em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. As medidas foram realizadas à temperatura ambiente.

2.4.7 Rendimento

O rendimento da secagem, para cada teste do planejamento, foi calculado como a razão entre a massa de sólidos no produto em pó coletado e a massa de sólidos na alimentação do secador (extrato da folha da capuchinha), de acordo com a Equação 8.

$$RS = \frac{M_{s,pó}}{M_{s,suco}} \cdot 100 \quad (8)$$

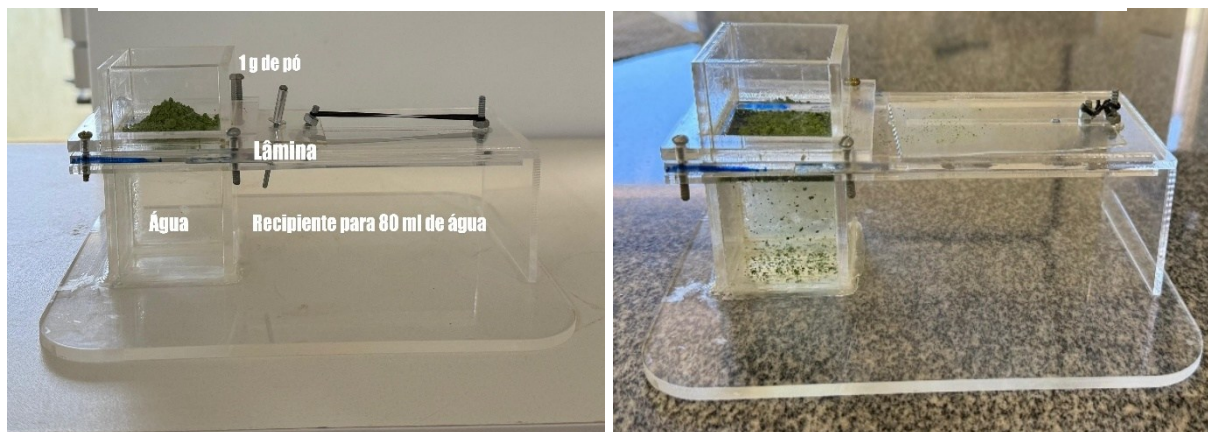
em que, *RS* é o rendimento da secagem (%); $M_{s,pó}$ é a massa de sólidos do pó (g) coletada após a secagem em *spray dryer* e $M_{s,suco}$ é a massa de sólidos no extrato (g) alimentada no *spray dryer*.

2.4.8 Determinação do tempo de molhamento

O tempo de molhamento (ou instantaneização) é o tempo necessário para que as partículas de pó fiquem completamente submersas na superfície de um líquido, sendo um indicador de sua reidratabilidade. A determinação foi realizada seguindo o método de Dacanal e Menegalli (2010), com adaptações. Para cada amostra, 1 g de pó foi depositado sobre a superfície de 80 ml de água destilada, mantida a 25°C em um recipiente padronizado com capacidade para 80 mL. O tempo foi medido com o auxílio de um cronômetro, registrando o período necessário para a completa submersão e molhamento de todas as partículas. Ensaios em que o pó permaneceu

em flotação por período superior a 1.200 segundos, foram registrados como não determinados (ND). O dispositivo utilizado na determinação é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema do dispositivo usado para determinar o tempo de molhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.5 Determinação da composição centesimal

2.5.1 Determinação do teor de proteína

A determinação de proteína foi realizada pelo método de Kjeldahl (AOAC, 2012). A análise foi realizada em triplicata, e um branco. Foi estabelecido o teor de nitrogênio e na sequência convertido em teor de proteína. A análise de nitrogênio foi realizada em três passos: digestão, destilação e titulação. Com o auxílio de uma balança analítica, 0,5 g de amostra foi adicionado ao tubo de digestão e acrescido de 1 g de mistura catalítica e de 5 mL de ácido sulfúrico. O tubo foi colocado no bloco digestor à temperatura de 50°C. A temperatura da capela foi elevada 50°C a cada 20 min até atingir 350°C, e estabilizar por mais 30 min, quando a mistura ficou com coloração límpida e transparente. Depois, o tubo foi retirado do aquecimento e adicionado de água destilada. Na sequência, o tubo foi acoplado ao destilador de nitrogênio e foi adicionada solução de hidróxido de sódio. Em seguida, o receptor de nitrogênio foi acoplado em um Erlenmeyer e neste foi adicionado ácido bórico para então, a mistura ser conduzida à destilação. Posteriormente, foi realizada a titulação da amostra com indicador de nitrogênio e determinação de nitrogênio total e utilizou-se as Equações 9 e 10 para a quantificação de nitrogênio total e proteína, respectivamente:

$$\% \text{ de nitrogênio total} = \frac{V \cdot N \cdot f \cdot 0,014}{m} \cdot 100 \quad (9)$$

$$\% \text{ de proteína} = \% \text{ de nitrogênio total} \cdot F \quad (10)$$

em que V é o volume (ml) da solução de ácido clorídrico 0,1 N utilizado na titulação; N é a normalidade teórica da solução de ácido clorídrico 0,1 N; f é o fator de correção da solução de ácido clorídrico 0,1 N; m é a massa (g) da amostra; e F é fator de conversão da relação nitrogênio/proteína (6,25).

2.5.2 Determinação do teor de lipídeos

A análise de lipídios foi realizada, através do extrato etéreo, de acordo com o Método de Extração Soxhlet (AOAC, 2012). Em um cartucho extrator foram adicionados cerca de 2 g de amostra. O cartucho foi colocado em um aparelho de Soxhlet, e este foi acoplado em balão e acrescido de 180 mL de solvente (éter de petróleo). O balão foi colocado em um condensador e o sistema foi levado à capela de exaustão para a extração, por um tempo mínimo de 3 h à temperatura de 350°C. Na sequência, o solvente foi recuperado em balão e colocado em estufa à 105°C pelo período de 1 h. Em seguida, o balão foi resfriado em dessecador até temperatura ambiente e pesado. O teor de gordura foi calculado a partir da Equação 11.

$$\text{Extrato Etéreo \%} \left(\frac{m}{m} \right) = \frac{A-B}{P} \cdot 100 \quad (11)$$

em que A é a massa (g) do balão mais o resíduo, B é a massa (g) do balão vazio; e, P é a massa (g) da amostra inicial.

2.5.3 Determinação do teor de cinzas

As cinzas totais foram determinadas ao se colocar cerca de 1 g de amostra em cadinhos de porcelana, aquecidos previamente em estufa convectiva a 105°C por no mínimo 30 min e resfriados em dessecadores até atingirem a temperatura ambiente. Logo após, foram previamente pesados com o auxílio de balança analítica. As amostras foram levadas a estufa novamente por 24 h antes de serem levadas à mufla, por 5 h à temperatura de 550°C. Após este tempo, os cadinhos foram retirados e colocados em dessecador para resfriarem. A massa dos cadinhos foi medida. A diferença entre a massa da amostra final mais o cadinho e a massa do cadinho

fornece a massa das cinzas da amostra. O teor de cinzas foi calculado conforme a Equação 12.

$$Cinzas (\%) = \left(\frac{M_{\text{cadinho} + \text{cinzas}} - M_{\text{cadinho vazio}}}{M_{\text{amostra}}} \right) \times 100 \quad (12)$$

em que $M_{\text{cadinho vazio}}$ é a massa (g) do cadinho limpo, seco e tarado em balança analítica (g); M_{amostra} é a massa da amostra da folha seca pesada no cadinho (g); e, $M_{\text{cadinho} + \text{cinzas}}$ é a massa (g) do conjunto (cadinho + resíduo mineral/cinzas) após resfriamento em dessecador até temperatura ambiente.

2.5.4 Determinação do teor de fibra bruta

Aproximadamente de 2 g de amostra foi colocado em saquinho de TNT (tecido-não-tecido), material composto por fibras como polipropileno ou viscose. Os saquinhos com amostras foram colocados em um béquer para hidratação com água destilada por 15 min, homogeneizando manualmente. Em seguida, os saquinhos foram posicionados no suporte do determinador de fibra. Foram adicionados 2 L de solução de ácido sulfúrico a 1,25%. Após 20 segundos de agitação, o equipamento foi ligado e ajustado a temperatura de 100°C. A partir do início da fervura, contou-se 30 min. Terminada a extração, o equipamento foi desligado e a solução escoada. Em seguida, foram adicionados 2 L de água destilada no equipamento; após a fervura, aguardaram-se 5 min e a água foi escoada. Logo após, adicionaram-se 2 L de solução básica a 1,25%; após a fervura, aguardaram-se 30 min e a solução foi novamente escoada. O processo de lavagem com água destilada (2 L, fervura por 5 min) foi repetido duas vezes. Os saquinhos foram retirados do suporte do equipamento, colocados em um béquer e lavados com álcool etílico absoluto, deixando imersos por 3 min; o procedimento foi repetido. Após a lavagem com álcool, os saquinhos foram lavados com acetona pura, repetindo-se o mesmo procedimento anterior. Os saquinhos foram então secos com o auxílio de papel toalha, colocados em cadinhos de porcelana e levados para a estufa a 105°C, onde permaneceram por 24 h. Após esse período, os cadinhos foram retirados, colocados em dessecador até atingirem a temperatura ambiente e pesados. Em seguida, foram levados à mufla à 550°C por 1 h. Após o resfriamento em dessecador, realizaram-se as pesagens finais. O teor de fibra bruta foi calculado conforme a Equação 13. As análises foram realizadas em triplicata.

$$Fibra\ Bruta\ (\%) = \frac{(C-A)-D}{B} \cdot 100 \quad (13)$$

em que, A = Massa do saquinho vazio (g), B = Massa da amostra (g), C = Massa do conjunto cadinho-saquinho-extrato (g) e D = Massa do conjunto cadinho-cinzas (g).

2.5.5 Determinação de carboidratos

Para a determinação de carboidratos das amostras foi utilizada a fração NIFEXT, obtida através do cálculo de diferença das demais frações da composição centesimal analisadas, de acordo com Hungerford (1995), a partir da Equação 14.

$$Carboidrato\ (\%) = 100 - (umidade + proteína + lipídios + cinzas + FB) \quad (14)$$

2.6 Determinação do teor de compostos fenólicos totais

2.6.1 Extração dos fenólicos totais

Os compostos fenólicos foram extraídos e quantificados segundo a metodologia descrita por Singleton et al. (1999) adaptada. Foram adicionados 20 mL de metanol em um tubo cônico tipo Falcon, contendo 0,2 g da amostra de folhas *in natura* e para as amostras com o pó, foram adicionados cerca de 0,03 g; o sistema foi agitado por 3 min em vórtex, e após isso, mantido em local escuro por uma hora em temperatura ambiente. Quando necessário utilizou-se a centrifuga para separar o sobrenadante (extrato).

2.6.2 Quantificação dos fenólicos totais

Para determinação da concentração de fenólicos totais foi transferido 0,5 mL do extrato fenólico em um tubo, após foi adicionado 2,5 mL do reagente Folin Ciocalteu (1:10). A mistura foi mantida à 50°C por 5 min. Em seguida, foram adicionados 2,0 mL de solução de carbonato de sódio, foi homogeneizado e mais uma vez, mantido à 50°C por 5 min. Logo após, os tubos foram resfriados em água gelada. O branco foi preparado com o mesmo procedimento nas devidas proporções, exceto sem o extrato. As leituras espectrofotométricas da amostra e do branco foram realizadas a 622 nm em espectrofotômetro (Modelo Espectrofotômetro UV1280 UVVIS Shimadzu). As

análises foram realizadas em triplicata. Os resultados foram calculados com base na curva padrão de ácido gálico, preparada nas mesmas condições que a amostra. O conteúdo fenólico total foi expresso em miligramas de equivalentes de ácido gálico por 100 g de capuchinha em base seca (Bertoldi, 2006).

2.6.3 Análise Estatística

Os dados experimentais obtidos nos 8 ensaios do planejamento experimental, foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e à modelagem por regressão polinomial múltipla. O modelo proposto quantificou os efeitos individuais e de interação das variáveis independentes quantitativas - Temperatura do Ar de Secagem (X_1), Vazão de Alimentação (X_2) e Vazão do Ar de Secagem (X_3) - sobre as variáveis de resposta investigadas (Umidade, Atividade de água, Higroscopicidade, Cor, Densidade *Bulk*, Concentração de Clorofila Total, Carotenoides, Fenólicos Totais, Rendimento e Tempo de Molhamento). A significância estatística dos efeitos e dos coeficientes de regressão estimados foi avaliada pelo teste t de *Student*, a um nível de significância de 0,05% ($p \leq 0,05$), que foram realizadas no software *Statistica* (v. 8.0, *StaSoft Inc*). Termos que apresentaram valores de $p > 0,05$ foram considerados estatisticamente não significativos e, portanto, suprimidos dos modelos matemáticos finais por meio do processo de eliminação retrógrada (*backward elimination*), visando à obtenção de equações preditivas ajustadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição centesimal

A caracterização bromatológica inicial da matéria-prima constitui uma etapa fundamental na pesquisa tecnológica de alimentos, pois estabelece o perfil basal de macronutrientes e minerais que influenciam as propriedades e o comportamento da planta durante o processamento (Souza et al., 2023). A determinação da composição centesimal das folhas frescas de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) revelou um perfil nutricional típico de hortaliças folhosas e Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC), caracterizado por um elevado teor de umidade e por uma expressiva densidade de compostos minerais e frações poliméricas fibrosas distribuídas na matéria seca (Borguini et al., 2016; Hegde et al., 2023). Os resultados das análises quantitativas, expressos em base úmida com seus respectivos desvios-padrão (Tabela 2), estabelecem a linha de base nutricional da matéria-prima e fornecem o teor de umidade necessário para os cálculos para os cálculos de balanço de massa e a conversão de dados para base seca (Masters, 1991; Santana et al., 2020).

Tabela 2 - Resultados da caracterização da composição centesimal das folhas frescas de capuchinha.

Análise	Resultado
Umidade (b.u. %)	81,97 ± 0,15
Proteína (%)	5,11 ± 0,01
Lipídeos (%)	0,69 ± 0,12
Cinzas (%)	1,93 ± 0,10
Fibra bruta (%)	5,71 ± 0,05
Carboidratos (%)	10,30 ± 0,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: b.u.: base úmida. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

A capuchinha apresentou teor de umidade de 81,97% (b.u.), valor próximo aos 82,20% relatados por Botrel et al. (2020) e condizente com o elevado conteúdo de água característico de hortaliças folhosas. A conversão para base seca (b.s.) revela o valor nutricional concentrado, o qual é diretamente relevante para o produto em pó. O valor de proteína encontrado foi de 28,37% em b.s. (equivalente a 5,11% b.u.). Esse resultado indica que, a capuchinha se destaca como uma excelente fonte de proteína vegetal. O teor é superior ao 5,00% b.u. reportado por Botrel et al. (2020), reforçando o seu valor nutricional para a formulação de alimentos funcionais. A concentração encontrada de lipídeos foi de 3,83% em b.s. (equivalente a 0,69% b.u.), resultado condizente com as expectativas para vegetais folhosos. Este valor garante a baixa densidade calórica e a alta estabilidade oxidativa do pó final, fator importante para a qualidade do produto submetido à secagem (Carter, 2019).

O valor de cinzas (1,93% b.u. ou 10,71% b.s.) é plausível e até superior ao valor de 1,53 b.u. encontrado por Botrel et al. (2020). Em base seca, 10,71% de cinzas indicam que mais de um décimo da massa seca do pó é composto por minerais. Este resultado confirma a reputação da capuchinha como uma planta rica em minerais (Ebert et al., 2021).

O teor de carboidratos por diferença foi de 10,30% em b.u., totalizando 57,12% em b.s. O valor analítico da fibra bruta (FB) de 5,71% em b.u. (ou 31,68% b.s.) é um resultado consistente e relevante. A fibra bruta (FB) é uma medida do componente fibroso da parede celular (principalmente celulose e lignina), e é parte da fração de carboidratos por diferença. O valor de 5,71% b.u. é superior aos 4,46% b.u. citados na literatura (Botrel et al., 2020), indicando que a sua amostra possui uma estrutura de parede celular mais robusta, porém, a distinção entre FB e Fibra Alimentar (FA) é importante. A FA inclui a FB mais hemiceluloses, pectinas e outras gomas, sendo um indicador nutricional mais abrangente. Um elevado valor de FB sugere que a FA será significativamente alto também, conferindo importantes benefícios funcionais ao produto, incluindo ele em pó, como auxílio no trânsito intestinal e modulação da glicemia (Park, 2011).

3.2 Umidade

Na Tabela 3 estão dispostos os resultados de umidade das folhas frescas e dos pós de capuchinha produzidos no *spray dryer*, de acordo com os experimentos do planejamento experimental.

Tabela 3 - Resultados da umidade das folhas frescas e dos pós de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Umidade (% b.u.)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
Folhas frescas	n.a.	n.a.	n.a.	81,97 ± 0,15
1	100	0,4	1,60	7,87 ± 0,29
2	100	0,4	1,85	6,56 ± 0,13
3	100	0,8	1,60	5,58 ± 0,06
4	100	0,8	1,85	7,78 ± 0,03
5	140	0,4	1,60	6,48 ± 0,23
6	140	0,4	1,85	6,70 ± 0,06
7	140	0,8	1,60	7,20 ± 0,14
8	140	0,8	1,85	7,81 ± 0,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: *Folhas frescas: *in natura*; n.a.: não se aplica; Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Observa-se que o teor de umidade da capuchinha (*Tropaeolum majus*) fresca (padrão) foi de 81,97% ± 0,15 (base úmida). Essa elevada quantidade de água confirma a natureza perecível da matéria-prima. O valor encontrado está consistente com a literatura para hortaliças folhosas e PANCs, que geralmente apresentam umidade acima de 75% (Hegde et al., 2023). Esta alta concentração de água é o principal fator limitante para a estabilidade e conservação da capuchinha, justificando a importância de um processo de desidratação para a obtenção de um produto estável (Borguini et al., 2016).

A secagem por atomização (*spray dryer*) mostrou-se aplicável, reduzindo a umidade em todas as condições testadas, resultando em valores baixos de umidade nos pós variando entre $5,58\% \pm 0,06$ (Exp. 3) e $7,87\% \pm 0,29$ (Exp. 1). Todos os pós obtidos situaram-se abaixo do limite crítico de 10% de umidade residual, faixa descrita na literatura tecnológica como o patamar seguro para garantir a redução de atividades microbianas e reações químicas e bioquímicas de deterioração (Santana et al., 2020). O alcance desses patamares é considerado um diferencial expressivo, visto que os ensaios foram conduzidos utilizando o extrato puro de capuchinha, sem a adição de adjuvantes de secagem ou agentes carreadores comerciais (como a maltodextrina), os quais são convencionalmente utilizados para elevar o teor de sólidos e facilitar a evaporação da água livre (Bazaria; Kumar, 2016).

O comportamento de secagem do pó puro de capuchinha é semelhante ao observado por Silva et al. (2022) na desidratação de extratos de taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) e ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*) sem a adição de agentes carreadores. Os autores relataram que é possível obter umidade residual abaixo de 8% em pós de PANC folhosas puras, perfil também verificado nos experimentos conduzidos nas menores temperaturas deste planejamento. Essa eficiência na remoção de água em matrizes folhosas sem carreador também foi observada por Santos e Oliveira (2024) em folhas de beldroega (*Portulaca oleracea*), confirmando que os teores de umidade obtidos estão dentro da faixa ideal para a estabilidade de pós vegetais.

A análise comparativa do planejamento revelou uma interação complexa entre as variáveis operacionais sobre a umidade final. Nos ensaios conduzidos na menor temperatura do ar de entrada (100°C), a umidade variou de 5,58% (Exp. 3) a 7,87% (Exp. 1). Sob condições de menor vazão de alimentação ($0,4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$) o aumento da temperatura de 100°C (Exp. 1) para 140°C (Exp. 5) promoveu a redução da umidade residual (de 7,87% para 6,48%), um fenômeno termodinâmico descrito em trabalhos de secagem, devido ao aumento do gradiente de temperatura entre o ar aquecido e a gota (Samborska et al., 2019; Woo et al., 2021).

No entanto, quando combinada à maior vazão de alimentação ($0,8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$), a elevação térmica para 140°C resultou em umidade de 7,20% (Exp. 7). Esse comportamento indica a ocorrência de enrijecimento da superfície da partícula (*case hardening*), onde o calor excessivo do ar seca instantaneamente a película externa da gota, formando uma crosta semipermeável que aprisiona a umidade remanescente

em seu núcleo e atua como uma barreira física contra a difusão capilar da água para o meio externo (Masters, 1991).

A análise estatística apresentou R^2 de 0,737. Entretanto, nenhum dos fatores avaliados apresentou efeito estatisticamente significativo ($p > 0,05$).

Esse resultado demonstra que, dentro da faixa experimental estudada, as variáveis independentes não exerceram influência suficiente sobre a umidade final do produto. Tal comportamento pode indicar que o processo atingiu um equilíbrio de secagem semelhante entre os tratamentos ou que outros fatores não avaliados exerceram maior influência sobre essa resposta.

3.3 Atividade de água

A determinação da atividade de água (a_w) configura-se como um dos parâmetros de controle mais críticos na física de alimentos pulverizados, superando a análise isolada do teor de umidade no que tange à predição da estabilidade química, bioquímica e microbiológica do material estocado (Rahman, 2020). Enquanto a umidade quantifica a massa total de água presente na matriz, a atividade de água mensura a energia livre e a disponibilidade termodinâmica dessa água para participar de reações de degradação, tais como a oxidação de pigmentos lipossolúveis, o escurecimento não enzimático e o crescimento de microrganismos xerofílicos (Syamaladevi et al., 2016; Reid et al., 2019). Nos pós de capuchinha (*Tropaeolum majus*) obtidos por atomização, o monitoramento desse parâmetro permite avaliar a eficiência do binômio tempo-temperatura na câmara de secagem em reduzir a água livre a patamares seguros, garantindo que o produto final permaneça em uma zona de conservação ideal e abaixo dos limites críticos para o colapso estrutural da matriz amorfa desprovida de carreadores (Santos et al., 2017).

Na Tabela 4 estão dispostos os resultados da atividade de água dos pós de capuchinha produzidos no *spray dryer*, de acordo com os experimentos do planejamento experimental.

Tabela 4 - Resultados da caracterização da atividade de água dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Atividade de água (a_w)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
1	100	0,4	1,60	0,270 ± 0,005
2	100	0,4	1,85	0,223 ± 0,003
3	100	0,8	1,60	0,264 ± 0,005
4	100	0,8	1,85	0,207 ± 0,005
5	140	0,4	1,60	0,223 ± 0,004
6	140	0,4	1,85	0,266 ± 0,005
7	140	0,8	1,60	0,253 ± 0,005
8	140	0,8	1,85	0,252 ± 0,005

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: *Folhas frescas: *in natura*; n.a.: não se aplica; Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os valores de atividade de água (a_w) observados nos pós obtidos apresentaram flutuações perceptíveis em decorrência das alterações impostas pelas variáveis do processo de atomização, situando-se na faixa compreendida entre 0,207 ± 0,005 no Experimento 4 e 0,270 ± 0,005 no Experimento 1. Na ciência de alimentos desidratados, o monitoramento da atividade de água é considerado um parâmetro mais preciso do que o teor de umidade isolado para prever a estabilidade de armazenamento do produto, uma vez que a a_w quantifica a fração de água livre que está verdadeiramente disponível para participar de reações químicas, enzimáticas e microbiológicas (Reid et al., 2019).

A obtenção de valores de atividade de água (a_w) inferiores a 0,300 está em consonância com os achados de Lima et al. (2023) na secagem por *spray dryer* de extratos folhosas de caruru (*Amaranthus viridis*). Os autores demonstraram que a secagem por atomização, mesmo sem a adição de carreadores, promove a remoção rápida da água livre também foi observada por Almeida et al. (2025) em pós puros de

folhas de capuchinha, confirmando a formação de uma estrutura que restringe a mobilidade hídrica e inibe reações de degradação durante o armazenamento.

A análise comparativa entre as diferentes condições operacionais revelou que o menor valor de atividade de água do planejamento experimental foi obtido no experimento 4 ($a_w = 0,207$), conduzido a 100°C e maior velocidade de ar ($1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$). Em contrapartida, os experimentos 2 (100°C e $V_{ar} = 1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) e 5 (140°C e $V_{ar} = 1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) apresentaram o segundo menor valor do estudo ($a_w = 0,223$). A análise estatística (Tabela 5) confirmou que a temperatura (T) e a velocidade do ar (V_{ar}), isoladamente, não apresentaram efeitos principais significativos. Em todas as condições testadas, os valores de a_w mantiveram-se abaixo de 0,300, patamar que assegura a estabilidade microbiológica e inibe reações degradativas no produto em pó (Syamaladevi et al., 2016).

Por outro lado, o Experimento 1 atingiu o maior valor de atividade de água (0,270), aproximando-se do limite de plasticidade convencional de pós alimentícios. Como o extrato atomizado era composto puramente por capuchinha, desprovido de adjuvantes para padronizar o comportamento termodinâmico do extrato, o sistema demonstrou alta suscetibilidade ao acúmulo de sólidos na câmara de secagem ao longo do tempo de operação contínua.

Embora valores inferiores de atividade de água sejam desejáveis para reduzir o escurecimento não-enzimático e garantir a fluidez do material, valores excessivamente baixos (próximos ou inferiores a 0,200) exigem cautela tecnológica. A remoção excessiva das moléculas de água pode comprometer a camada monomolecular protetora que envolve os constituintes sólidos da matriz, deixando os carotenoides nativos da capuchinha, que por sua vez, são altamente termossensíveis e suscetíveis à oxidação, expostos à ação direta do oxigênio atmosférico residual presente nos poros das partículas (Rahman, 2020). Esse fenômeno pode acelerar as taxas de auto-oxidação e descoloração do pó ao longo do tempo, o que reforça a relevância de correlacionar esses achados com os estudos de retenção de compostos bioativos da planta (Borguini et al., 2016).

Tabela 5 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para atividade de água.

Fator	Efeito	Valor de p
Te x V _{ar}	0,036	0,027

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($L \cdot h^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($m^3 \cdot min^{-1}$) e Te à temperatura ($^{\circ}C$).

O modelo ajustado para a atividade de água apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,962$), demonstrando que aproximadamente 96,2% da variabilidade experimental foi explicada pelos fatores incluídos no modelo. Dentre os efeitos avaliados, apenas a interação entre temperatura e vazão do ar de secagem apresentou influência estatisticamente significativa ($p = 0,027$).

A ausência de efeitos principais significativos indica que a temperatura e a velocidade do ar, quando avaliadas isoladamente, não foram suficientes para alterar a atividade de água do produto. Entretanto, a significância da interação demonstra que o comportamento dessa variável depende da atuação simultânea desses fatores. O efeito positivo observado indica que determinadas combinações entre temperatura e velocidade do ar favoreceram o aumento da atividade de água, evidenciando um comportamento integrado entre as variáveis de processo, ou seja, a $100^{\circ}C$ o aumento do fluxo de ar melhorou a remoção de água; a $140^{\circ}C$ ele reduziu o tempo de residência a ponto de prejudicá-la.

Esse resultado pode estar relacionado às modificações estruturais promovidas durante a secagem, uma vez que diferentes combinações operacionais alteram a distribuição e a disponibilidade da água livre na matriz alimentar.

3.4 Cor

A cor constitui um atributo fundamental na avaliação da qualidade dos alimentos, especialmente dos produtos desidratados, por influenciar diretamente a percepção visual, a expectativa de sabor e a aceitação final por parte do consumidor (Cano-Chauca et al., 2005). Os valores de L^* , a^* e b^* referentes à folha fresca, bem como aos pós obtidos por secagem em *spray dryer*, estão apresentados na Tabela 6.

A cor da folha fresca é caracterizada por um baixo valor de L^* (20,49), indicando que a amostra apresenta baixa reflectância estrutural (caráter escuro), e um valor

negativo de a^* (-19,47), confirmando a forte tonalidade verde inerente à alta concentração de clorofilas ativas no tecido vegetal *in natura* (Pereira; Silva, 2024).

O processo de *spray dryer* alterou significativamente a cor, promovendo aumento da luminosidade (L^*) dos pós (39,09 a 47,33). Esse comportamento pode estar associado à remoção de água durante a secagem e à transformação do extrato líquido em partículas sólidas, modificando as propriedades de interação da amostra com a luz. Além disso, características das partículas formadas, como tamanho, morfologia e superfície, podem influenciar a dispersão da luz e, conseqüentemente a luminosidade aparente dos pós (Oliveira et al., 2022).

Tabela 6 - Resultados da caracterização da cor das folhas frescas e dos pós de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			L*	a*	b*	ΔE
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)				
Folhas frescas	n.a.	n.a.	n.a.	20,49 ± 0,41	-19,47 ± 0,48	19,35 ± 0,98	n.a
1	100	0,4	1,60	47,13 ± 0,20	-13,73 ± 0,07	42,30 ± 0,22	35,63
2	100	0,4	1,85	44,72 ± 0,72	-11,80 ± 0,05	46,37 ± 0,37	37,09
3	100	0,8	1,60	44,32 ± 0,81	-13,27 ± 0,08	45,08 ± 0,26	35,61
4	100	0,8	1,85	47,33 ± 0,07	-12,98 ± 0,03	41,81 ± 0,09	35,59
5	140	0,4	1,60	44,11 ± 0,08	-8,26 ± 0,03	46,57 ± 0,13	37,74
6	140	0,4	1,85	42,75 ± 0,04	-8,80 ± 0,05	47,87 ± 0,07	37,72
7	140	0,8	1,60	40,57 ± 0,03	-9,30 ± 0,03	44,54 ± 0,13	33,78
8	140	0,8	1,85	39,09 ± 0,04	-8,29 ± 0,05	46,26 ± 0,26	34,57

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: *Folhas frescas: *in natura*; n.a.: não se aplica; Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os parâmetros cromáticos dos pós obtidos por atomização evidenciaram modificações estruturais e ópticas marcantes em comparação com a matriz fresca, com os valores de cromaticidade verde-vermelha (a^*) oscilando entre $-13,73 \pm 0,07$ (Exp. 1) e $-8,26 \pm 0,03$ (Exp. 5), e a cromaticidade azul-amarela (b^*) situando-se entre $41,81 \pm 0,09$ (Exp. 4) e $47,87 \pm 0,07$ (Exp. 6). A avaliação instrumental da cor em produtos desidratados fornece subsídios fundamentais para inferir o nível de preservação de pigmentos termossensíveis e a ocorrência de reações térmicas durante o período de secagem (Santos et al., 2017). Como caracterização inicial, as folhas frescas apresentaram coordenadas cromáticas de $L^* = 20,49 \pm 0,41$, $a^* = -19,47 \pm 0,48$ e $b^* = 19,35 \pm 0,98$.

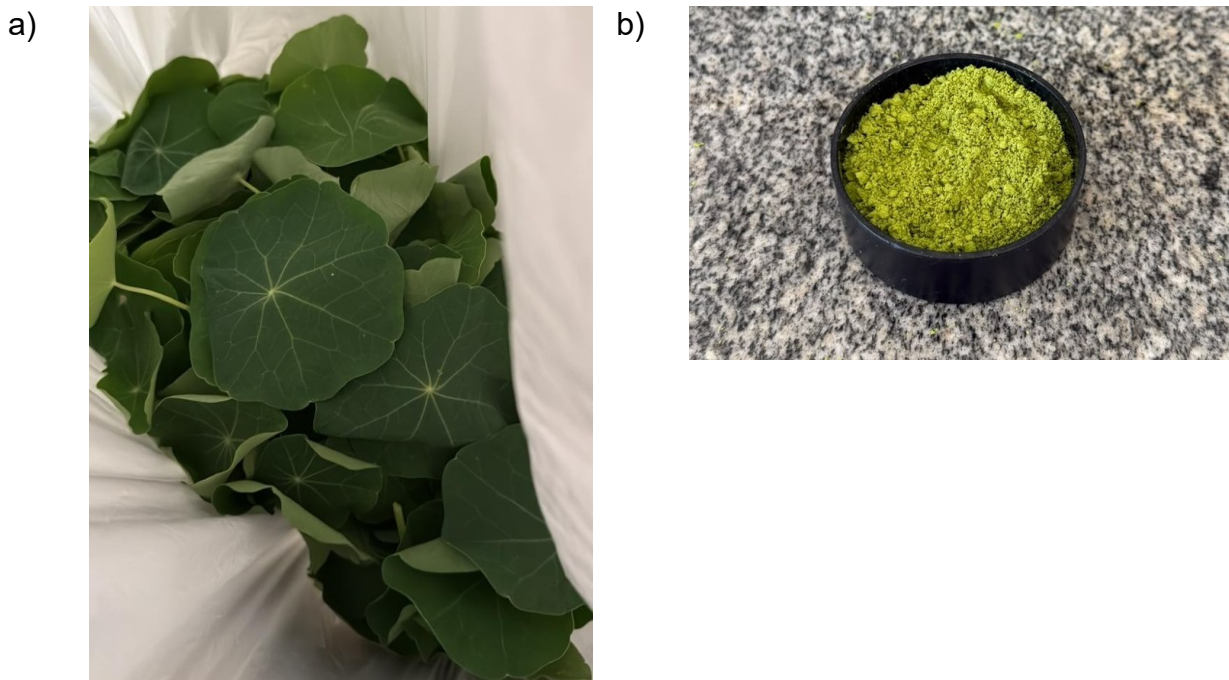
O incremento acentuado nos valores de luminosidade (L^*) de todos os pós em relação às folhas frescas reflete o efeito direto do processo de desidratação e da pulverização da matriz amorfa. A fragmentação do extrato líquido em micropartículas esféricas altera os coeficientes de dispersão e reflexão da luz incidente sobre a superfície do pó, gerando superfícies com maior opacidade óptica e maior reflectância global (Cano-Chauca et al., 2005). Esse comportamento se sobressai nos ensaios conduzidos a 100°C (Exp. 1 ao Exp. 4), onde a menor severidade térmica minimizou reações de escurecimento escuro. Em contrapartida, os pós obtidos em temperaturas mais elevadas (140°C), em especial sob maiores taxas de vazão de alimentação (como no Exp. 7, $L^* = 40,57$; e Exp. 8, $L^* = 39,09$), demonstraram uma tendência de decréscimo na luminosidade, o que sinaliza o início de processos de degradação térmica ou caramelização de carboidratos livres (Bazaria; Kumar, 2016).

O comportamento da coordenada de cromaticidade a^* indicou uma perda parcial da intensidade da coloração verde original em todas as condições de secagem operadas. O recuo dos valores negativos de a^* (que se aproximaram de zero, atingindo o menor valor absoluto de $-8,26$ no Exp. 5) provavelmente decorreu da degradação térmica das clorofilas nativas presentes no extrato bruto de capuchinha. A exposição ao ar aquecido na câmara de secagem promove a conversão de clorofilas em feofitinas por meio da perda do átomo de magnésio central do anel porfirínico, deslocando a coloração para tons mais opacos ou ligeiramente oliváceos (Samborska et al., 2019). Notavelmente, a preservação do caráter esverdeado foi mais pronunciada nos experimentos sob temperaturas moderadas ou maiores fluxos de alimentação (como Exp. 1 e Exp. 3), condições nas quais o resfriamento por

evaporação e o menor estresse térmico atuaram de forma protetiva sobre o pigmento vegetal (Murahovschi et al., 2021).

Simultaneamente, os valores da coordenada b^* sofreram uma elevação expressiva nos pós (faixa de 41,81 a 47,87) em comparação às folhas frescas (19,35), indicando uma intensa transição em direção ao quadrante amarelo. Esse aumento decorre principalmente da perda do tom verde – decorrente da degradação da clorofila, evidenciada pelo recuo da coordenada a^* de -13,73 para -8,26 -, a qual desmascara os pigmentos amarelos remanescentes, associada ao escurecimento não enzimático, que também desloca a cor para o amarelo-pardo. Essa intensificação do amarelo refletiu-se em variações expressivas na diferença total de cor (ΔE), que oscilou de 33,78 (Exp. 7) a 37,74 (Exp. 5). Isso evidencia que as condições operacionais de maior severidade térmica e evaporação hídrica (como o Exp. 5) provocaram o maior distanciamento óptico global em relação ao tecido vegetal *in natura* (Ooi et al., 2020).

Figura 8 - a) Folhas de capuchinha frescas e b) pó obtido, após processo de secagem por *spray dryer*, (experimento 6).



O deslocamento das coordenadas cromáticas em direção ao quadrante amarelo e a elevação expressiva da luminosidade (L^*) em relação ao tecido fresco alinham-se aos resultados obtidos por Oliveira et al. (2022) com pós atomizados de ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*). Os autores atribuíram o ganho de opacidade e o

clareamento óptico ao rearranjo físico das micropartículas esféricas amorfas que alteram os índices de refração de luz, independentemente da presença de maltodextrina. Adicionalmente, o recuo dos valores negativos de a^* (perda de verde) devido ao estresse térmico em 140°C foi documentado por Pereira e Silva (2024) em estudos cromáticos com a própria *Tropaeolum majus*, confirmando a conversão molecular de clorofilas em feofitinas sob condições de alta entalpia.

Tabela 7 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para atividade de água.

Fator	Efeito	Valor de p
V_{alim}	-2,157	0,033

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) e T_e à temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

O modelo apresentou coeficiente de determinação igual a 0,955. Apenas a vazão de alimentação apresentou efeito significativo ($p = 0,033$), sendo observado coeficiente negativo.

O efeito negativo da vazão de alimentação (-2,157) indica que os pós obtidos com $0,80 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ apresentaram menor afastamento cromático em relação à folha fresca do que os obtidos com $0,40 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. Esse comportamento pode estar relacionado ao menor tempo de exposição térmica por unidade de massa de sólidos sob maior carga de alimentação, hipótese coerente com a maior retenção de coordenada a^* negativa observada nos ensaios correspondentes.

3.5 Determinação do teor de clorofila total

Os valores do teor de clorofila total dos pós obtidos a partir das folhas de capuchinha, sem branqueamento, produzidos por meio do processo de secagem, conforme os experimentos do planejamento experimental, estão apresentados na Tabela 8.

Os teores de clorofila total quantificados ao longo dos 8 experimentos de atomização mostraram-se, em sua maioria, numericamente superiores ao valor basal da folha fresca. Esse perfil reflete o efeito conjunto da concentração física de sólidos na matéria seca (Masters, 1991) e da quebra estrutural das células pelo bico injetor,

o que facilita de forma marcante a migração do pigmento para o solvente no momento da análise quantitativa (Santos et al., 2017). Os resultados expressos em relação à matéria-prima representam, portanto, a taxa de recuperação e preservação do pigmento nativo sob as diferentes condições de entalpia do secador, sem que ocorra síntese molecular no sistema (Gomes et al., 2021).

Este fenômeno não representa um aumento real da clorofila, mas sim um efeito de concentração na matriz do pó, conjugado à alta eficácia de extração e à proteção conferida pelo processo. A secagem remove a maior parte da água, concentrando os sólidos (incluindo a clorofila) na massa final. A clorofila é um pigmento extremamente termossensível, sendo facilmente convertida em feofitinas (compostos marrons) na presença de calor e acidez, o que resultaria em perdas e consequente redução da cor verde (Oliveira et al., 2025). O fato de o valor ter aumentado na melhor condição (Exp. 1) demonstra que a degradação foi minimizada.

Tabela 8 - Resultados da concentração de clorofila total das folhas frescas e dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Clorofila total mg · 100 g ⁻¹ (b.s.)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
Folhas frescas	n.a.	n.a.	n.a.	755,33 ± 30,87
1	100	0,4	1,60	1500,75 ± 57,91
2	100	0,4	1,85	1306,86 ± 33,73
3	100	0,8	1,60	1040,65 ± 40,16
4	100	0,8	1,85	1031,88 ± 38,42
5	140	0,4	1,60	912,89 ± 37,56
6	140	0,4	1,85	868,13 ± 33,68
7	140	0,8	1,60	853,56 ± 10,71
8	140	0,8	1,85	838,31 ± 12,68

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: *Folhas frescas: *in natura*; n.a.: não se aplica; Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os teores de clorofila total nos pós obtidos por atomização evidenciaram uma variação em função das condições operacionais do sistema, situando-se entre $838,31 \pm 12,68 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (b.s.) no Experimento 8 (140°C ; $0,8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$; $1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) e $1500,75 \pm 57,91 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (b.s.) no Experimento 1 (100°C ; $0,4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$; $1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$). Como parâmetro basal, as folhas frescas de capuchinha apresentaram um teor de $755,33 \pm 30,87 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (b.s.). O fato de as matrizes desidratadas apresentarem valores em base seca superiores à matéria-prima *in natura* é atribuído à desorganização estrutural das membranas dos cloroplastos promovida pelo estresse mecânico de cisalhamento no bico atomizador e pelo choque térmico. Essa microruptura celular otimiza a acessibilidade do solvente orgânico ao pimento durante a extração analítica no laboratório, aumentando a eficiência da quantificação frente ao tecido vegetal íntegro (Santos et al., 2017).

A avaliação comparativa entre os ensaios revelou que a temperatura do ar de entrada (T) exerceu uma influência inversamente proporcional sobre a estabilidade do pigmento. Ao confrontar os experimentos operados sob menor vazão de alimentação ($0,4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$) e menor fluxo de ar ($1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$), constata-se que a elevação térmica de 100°C (Exp. 1) para 140°C (Exp. 5) promoveu uma severa redução no teor de clorofila total, decrescendo de $1500,75 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ para $912,89 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Esse decréscimo fundamenta-se na termolabilidade das clorofilas, cujas estruturas sofrem degradação térmica acentuada quando expostas a altas temperaturas de bulbo seco na câmara, acelerando a clivagem do anel porfirínico e a consequente perda da coloração verde nativa, o que corrobora o recuo dos valores negativos da coordenada cromática a^* discutidos anteriormente (Samborska et al., 2019).

Ademais, a interação com as taxas de fluxo mássico demonstrou mitigar ou acentuar esse estresse térmico. Nos ensaios conduzidos a 100°C , o incremento na vazão de alimentação de $0,4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ (Exp. 1) para $0,8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ (Exp. 3) reduziu a retenção de clorofila de $1500,75 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ para $1040,65 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Sob temperaturas moderadas, o aumento no volume de fluido injetado reduz a eficiência global de secagem e prolonga o tempo de exposição das partículas úmidas ao calor radiante dentro da câmara antes de atingirem o ciclone, estendendo o período de injúria térmica sobre as moléculas lipossolúveis (Murahovschi et al., 2021). Em contrapartida, sob a temperatura máxima de 140°C (Exp. 5 ao Exp. 8), a manutenção de teores mais baixos e homogêneos (faixa de $838,31$ a $912,89 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) indica que o patamar

de energia térmica elevada se sobrepõe aos efeitos de fluxo, atuando como o fator limitante principal para a integridade química da clorofila (Bazaria; Kumar, 2016).

O fenômeno de concentração e facilitação extrativa da clorofila total nos pós desidratados encontra amparo na literatura científica de PANC folhosas. Nascimento et al. (2023), ao estudarem a estabilidade de pigmentos em folhas atomizadas de azedinha (*Rumex acetosa*), observaram que o cisalhamento pneumático no bico injetor rompe as barreiras estruturais dos cloroplastos, tornando o pigmento remanescente muito mais acessível ao solvente orgânico no ensaio analítico. Essa tendência de alta retenção sob temperaturas moderadas (100°C a 120°C) também foi validada por Gomes et al. (2021) com extratos de capuchinha, consolidando a premissa de que o resfriamento evaporativo imediato atua como um fator protetor da integridade do anel porfirínico antes da completa secagem da partícula.

Tabela 9 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para concentração de clorofila total.

Fator	Efeito	Valor de p
Te	-351,813	0,011
V_{alim}	-206,057	0,031
Te x V_{alim}	161,482	0,049

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($L \cdot h^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($m^3 \cdot min^{-1}$) e Te à temperatura ($^{\circ}C$).

O coeficiente de determinação (R^2) de regressão foi de 0,986. Pode ser evidenciado que, seja por termo isolado ou por meio de interação a temperatura e vazão de alimentação afetaram a clorofila dos pós.

Nota-se que o fator que afetou mais fortemente a clorofila, e de forma negativa, foi a temperatura. Pelos sinais dos efeitos significativos de forma isolada e pelos seus valores elevados (ainda que exista efeito de interação), nota-se uma tendência de redução do teor de clorofila com o aumento desses fatores, comportamento este que pode ser esperado devido à elevada sensibilidade desse pigmento ao calor e às condições de processamento, favorecendo sua degradação e a formação de derivados como feofitinas.

3.6 Determinação da concentração de carotenoides

Os carotenoides representam uma classe essencial de pigmentos lipofílicos naturais responsáveis pelas colorações que variam do amarelo ao vermelho em diversas matrizes vegetais, destacando-se na nutrição humana por suas propriedades provitamínicas A e sua marcante atividade antioxidante celular (Borguini et al., 2016). Nas estruturas foliares de capuchinha (*Tropaeolum majus*), a quantificação e a preservação dessas moléculas hidrofóbicas constituem parâmetros de grande relevância, uma vez que a literatura as aponta como marcadores biológicos do valor nutracêutico e funcional da planta (Hedge et al., 2023). Todavia, a estabilidade química dos carotenoides durante o processamento em *spray dryer* é criticamente influenciada pelas variáveis operacionais do sistema. Por possuírem uma estrutura molecular altamente insaturada, rica em ligações duplas conjugadas, essas substâncias tornam-se extremamente suscetíveis a rotas de degradação oxidativa, isomerização geométrica e clivagem térmica quando expostas a fluxos de ar com elevada entalpia, tornando o monitoramento do binômio tempo-temperatura na câmara um fator decisivo para a retenção do pigmento na matriz amorfa pura (Bazaria; Kumar, 2016; Santos et al., 2017).

A Tabela 10 apresenta a concentração de carotenoides totais para a folha fresca e para as amostras de pó obtidas no planejamento experimental.

Tabela 10 - Resultados da concentração de carotenoides das folhas frescas e dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Carotenoides mg · 100 g ⁻¹ (b.s.)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
Folhas frescas	n.a.	n.a.	n.a.	22,28 ± 0,95
1	100	0,4	1,60	39,93 ± 1,35
2	100	0,4	1,85	37,77 ± 1,05
3	100	0,8	1,60	28,72 ± 1,35
4	100	0,8	1,85	27,85 ± 1,15
5	140	0,4	1,60	26,83 ± 1,49
6	140	0,4	1,85	26,19 ± 0,87
7	140	0,8	1,60	23,70 ± 0,20
8	140	0,8	1,85	24,33 ± 0,32

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: *Folhas frescas: *in natura*; n.a.: não se aplica; Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os teores de carotenoides totais nos pós de capuchinha (*Tropaeolum majus*) revelaram flutuações expressivas em função das condições operacionais de secagem, estendendo-se desde 23,70 ± 0,20 mg · 100 g⁻¹ (b.s.) no Experimento 7 (140°C; 0,8 L · h⁻¹; 1,60 m³ · m⁻¹) até o patamar de 39,93 ± 1,35 mg · 100 g⁻¹ (b.s.) no Experimento 1 (100°C). Como valor de controle basal, a folha fresca apresentou 22,28 ± 0,95 mg · 100 g⁻¹ (b.s.). Similarmente ao verificado para as clorofilas, a obtenção de valores numericamente superiores nos pós desidratados decorre do efeito macroscópico de concentração dos sólidos solúveis gerado pelo estiramento e remoção da fração líquida, além do rompimento mecânico das paredes celulares pelo bico injetor, o que expõe as estruturas lipofílicas dos plastídeos e amplifica a eficiência de migração do soluto para o solvente extrator no momento da análise quantitativa (Santos et al., 2017).

A avaliação comparativa do planejamento evidencia que a temperatura de bulbo seco do ar de entrada (T) atuou como o principal fator de degradação estrutural dos compostos. Sob condições controladas de menor vazão de alimentação (0,4 L ·

h^{-1}) e menor fluxo de ar ($1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$), a elevação da temperatura de 100°C (Exp. 1) para 140°C (Exp. 5) provocou um decréscimo drástico no teor de carotenoides, recuando de $39,93 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ para $26,83 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Os carotenoides são pigmentos caracterizados por uma cadeia poliênica rica em duplas ligações conjugadas, configuração molecular que os torna extremamente vulneráveis à isomerização térmica (conversão da forma *trans* nativa para formas *cis* menos estáveis) e à clivagem oxidativa direta induzida pela exposição prolongada ao oxigênio em ambientes de elevado estresse calórico na câmara de secagem (Bazaria; Kumar, 2016).

As interações com as vazões de alimentação e do ar também modularam a taxa de retenção desses constituintes lipossolúveis. Nos ensaios operados a 100°C , o incremento na vazão de alimentação de $0,4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ (Exp. 1) para $0,8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ (Exp. 3) gerou um decréscimo de $39,93 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ para $28,72 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. A injeção de uma carga mássica superior sob temperaturas moderadas sobrecarrega a capacidade evaporativa imediata do ar, estendendo o tempo necessário para que a gota atinja o estado vítreo e mantendo as micelas biológicas em contato direto com a umidade aquecida por mais tempo, o que catalisa vias secundárias de degradação oxidativa (Murahovschi et al., 2021). Por outro lado, nos ensaios a 140°C (Exp. 5 ao Exp. 8), os teores mantiveram-se baixos e próximos entre si (faixa de $23,70$ a $26,83 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), confirmando que a energia térmica elevada atua de forma limitante e soberana sobre a estabilidade desses pigmentos, independente dos fluxos mecânicos associados (Samborska et al., 2019).

A vulnerabilidade dos carotenoides à oxidação e isomerização térmica observada nos ensaios de maior temperatura (140°C) corrobora os achados de Costa et al. (2024) na desidratação de folhas de major-gomes (*Talinum paniculatum*). Naquela pesquisa, os autores relataram que o estresse térmico contínuo na câmara promove a degradação de cadeias poliênicas insaturadas quando a matriz vegetal pura não conta com o recobrimento macromolecular de um carreador comercial. Esse perfil de degradação sob alta taxa de evaporação também foi verificado por Martins et al. (2022) ao avaliarem a retenção de carotenoides em flores e folhas de *Tropaeolum majus*, justificando a necessidade de controle rigoroso do binômio tempo-temperatura para preservar a atividade biológica desses lipídios funcionais.

Tabela 11 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para concentração de carotenoides.

Fator	Efeito	Valor de p
Te	-8,305	0,000
V_{alim}	-6,530	0,000
V_{ar}	-0,760	0,004
Te x V_{alim}	4,035	0,000
Te x V_{ar}	0,755	0,004
V_{alim} x V_{ar}	0,640	0,005

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($L \cdot h^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($m^3 \cdot min^{-1}$) e Te à temperatura ($^{\circ}C$).

O modelo apresentou coeficiente de determinação igual a 1,000, indicando que toda a variação experimental foi explicada pelos fatores avaliados. Todos os fatores principais e todas as interações apresentaram significância estatística ($p < 0,05$).

Por meio dos efeitos estimados, observa-se que o teor de carotenoides apresentou efeito significativo na forma isolada e por interação. Os efeitos de forma isolada apresentaram coeficientes negativos, indicando que o aumento da temperatura, da vazão de alimentação e da vazão do ar de secagem tendem a promover uma redução no teor de carotenoides. O fator que afetou mais fortemente os carotenoides, e de forma negativa, foi a temperatura. Assim nota-se uma tendência de diminuição dos carotenoides em altas temperaturas, esse comportamento pode estar atribuído e à degradação térmica durante o processamento, uma vez que carotenoides constituem compostos altamente sensíveis ao calor.

Entretanto, as interações apresentaram coeficientes positivos, demonstrando que determinadas combinações dos fatores reduzem as perdas. Esse resultado evidencia que o efeito dos fatores não deve ser analisado isoladamente, pois existe comportamento integrado entre eles.

3.7 Determinação do teor de fenólicos totais

Os compostos fenólicos constituem uma classe heterogênea de metabólitos secundários amplamente distribuídos no reino vegetal, cuja relevância biológica e

industrial fundamenta-se, majoritariamente, em seu elevado potencial antioxidante proveniente da capacidade de sequestrar radicais livres e quelar metais transicionais (Borguini et al., 2016). Na caracterização de Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) como a capuchinha (*Tropaeolum majus*), a quantificação dessas frações polifenólicas totais assume papel de destaque para a validação da matriz como um alimento funcional ou ingrediente de valor nutracêutico (Hegde et al., 2023). Todavia, a preservação e a retenção dessas estruturas químicas durante a transição do extrato líquido para o estado pulverizado em *spray dryer* dependem de um balanço crítico entre a termossensibilidade de seus anéis aromáticos e as condições cinéticas de secagem. O monitoramento desse parâmetro nos pós permite avaliar em que medida variáveis como o tempo de residência e a temperatura do ar de entrada atuam na clivagem oxidativa direta ou no favorecimento do autoencapsulamento dessas biomoléculas funcionais pela própria matriz amorfa vegetal (Bazaria; Kumar, 2016; Tang et al., 2019).

A Tabela 12 apresenta o teor de fenólicos totais, expresso em mg de equivalentes de ácido gálico por 100 g de amostra (b.s.), para a folha fresca e para todas as amostras de pó obtidas.

Tabela 12 - Resultados do teor de fenólicos totais das folhas frescas e dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Fenólicos mg ác. gálico · 100 g ⁻¹ (b.s.)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
Folhas frescas	n.a.	n.a.	n.a.	34078,93 ± 2424,709
1	100	0,4	1,60	32764,83 ± 144,151
2	100	0,4	1,85	32365,06 ± 345,892
3	100	0,8	1,60	30992,12 ± 657,942
4	100	0,8	1,85	31730,76 ± 673,623
5	140	0,4	1,60	29561,28 ± 1321,889
6	140	0,4	1,85	32026,06 ± 1569,995
7	140	0,8	1,60	30288,69 ± 609,744
8	140	0,8	1,85	31440,85 ± 197,353

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: *Folhas: *in natura*; n.a.: não se aplica; Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os teores de compostos fenólicos totais quantificados nas matrizes atomizadas de capuchinha (*Tropaeolum majus*) revelaram perfis de retenção estáveis face às variações das condições operacionais impostas, distribuindo-se na faixa compreendida entre 29561,28 ± 1321,88 mg·100 g⁻¹ (b.s.) no Experimento 5 (140°C; 0,4 L · h⁻¹; 1,60 m³ · m⁻¹) e 32764,83 ± 144,151 mg · 100 g⁻¹ (b.s.) no Experimento 1. Para fins de controle descritivo, a folha fresca registrou um valor basal de 34078,93 ± 2424,70 mg·100 g⁻¹ (b.s.). Ao contrário do comportamento verificado para os pigmentos clorofilados e carotenoides, os compostos fenólicos totais não manifestaram incrementos numéricos expressivos após a desidratação, o que evidencia que as perdas por termodegradação destas estruturas polifenólicas tenderam a contrabalançar os ganhos decorrentes da concentração física de solutos solúveis durante o processo de secagem (Borguini et al., 2016).

A análise comparativa do planejamento indicou que a temperatura do ar de entrada (T) atuou de maneira pontual sobre a estabilidade estrutural dessas frações

bioativas. Sob menor vazão de alimentação ($0,4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$) e menor vazão do ar ($1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$), a elevação térmica de 100°C (Exp. 1) para 140°C (Exp. 5) promoveu o menor valor de retenção do planejamento ($29561,28 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$). Embora muitos compostos fenólicos possuam anéis aromáticos que conferem relativa estabilidade estrutural, a exposição a correntes de ar com alta entalpia pode clivar ligações éster e glicosídicas de polifenóis complexos, transformando-os em monômeros mais simples ou degradando-os por vias oxidativas antes da vitrificação da partícula (Bazaria; Kumar, 2016).

Contudo, o incremento nas taxas de vazão de fluidos do sistema demonstrou exercer um papel protetivo contra o estresse térmico em altas temperaturas. Ao avaliar os ensaios conduzidos a 140°C , nota-se que o aumento na vazão do ar de secagem de $1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ (Exp. 5) para $1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ (Exp. 6) atenuou a degradação, elevando o teor de fenólicos para $32026,06 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Esse comportamento fundamenta-se nos princípios cinéticos do atomizador: fluxos gasosos intensificados reduzem o tempo de residência das partículas em formação dentro da zona de maior estresse térmico da câmara, diminuindo a exposição cumulativa dos compostos ao oxigênio aquecido e preservando a integridade das frações polifenólicas nativas do extrato vegetal puro (Ooi et al., 2020).

A sutil redução nos teores de compostos fenólicos totais em comparação com a matriz fresca, assemelha-se ao comportamento descrito por Ribeiro et al. (2023) na secagem por atomização de extratos de serralha (*Sonchus oleraceus*). Os autores demonstraram que, embora ocorra perda parcial de polifenóis termolábeis por clivagem oxidativa, a rápida formação da crosta sólida ao redor da gota atua como uma barreira física parcial contra a difusão do oxigênio. Essa retenção satisfatória em sistemas desprovidos de adjuvantes hidrofílicos foi igualmente observada por Souza e Dias (2025) em matrizes de capuchinha, confirmando que os açúcares nativos da planta conseguem exercer um papel protetivo por autoencapsulamento na transição vítrea.

Além do impacto térmico promovido pela secagem por atomização, é fundamental reconhecer a contribuição da degradação enzimática pré-processamento sobre o teor de fenólicos totais. Durante as etapas mecânicas de trituração e homogeneização do tecido vegetal, a ruptura celular promove o contato direto entre as enzimas endógenas — principalmente a polifenoloxidase (PPO) e a peroxidase

(POD) — e seus substratos fenólicos. Como a PPO e a POD permanecem ativas no extrato durante o tempo de espera até a secagem, reações de oxidação enzimática ocorrem previamente à atomização, resultando na conversão e perda de compostos fenólicos simples e pigmentos antes mesmo do tratamento térmico na câmara (Silva et al., 2020).

O modelo apresentou $R^2 = 0,827$ e nenhum fator foi significativo ($p > 0,05$). Esse resultado sugere que os compostos fenólicos permaneceram relativamente estáveis nas condições experimentais empregadas, indicando que os níveis dos fatores avaliados não foram suficientes para promoverem alterações detectáveis nessa resposta.

3.8 Higroscopicidade

A higroscopicidade (H_i) é uma propriedade fundamental que mede a capacidade de um material adsorver umidade do ar ambiente quando exposto a uma atmosfera com umidade relativa controlada (Cano-Chauca et al., 2005). Pós com alta concentração de açúcares e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como é o caso de extratos vegetais puros, são intrinsecamente higroscópicos devido à natureza hidrofílica desses componentes e à presença de múltiplos sítios ativos (hidroxilas livres) com alta afinidade por moléculas de água (Bhandari et al., 1993). Baixos valores de H_i são desejáveis na tecnologia de partículas, pois indicam maior estabilidade mecânica, menor tendência à aglomeração (*caking*) decorrente da plastificação da superfície amorfa e, conseqüentemente, um maior tempo de vida útil do produto (Bhandari et al., 1997). A Tabela 13 apresenta os resultados da caracterização da higroscopicidade dos pós de capuchinha obtidos por *spray dryer*.

Tabela 13 - Resultados da caracterização da higroscopicidade dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Higroscopicidade (%)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
1	100	0,4	1,60	17,98 ± 0,05
2	100	0,4	1,85	18,23 ± 0,07
3	100	0,8	1,60	15,86 ± 0,10
4	100	0,8	1,85	16,65 ± 0,02
5	140	0,4	1,60	18,12 ± 0,04
6	140	0,4	1,85	19,63 ± 0,03
7	140	0,8	1,60	20,86 ± 0,03
8	140	0,8	1,85	21,00 ± 0,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os valores de higroscopicidade obtidos para os pós de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) evidenciaram elevado caráter higroscópico frente às variáveis operacionais do processo, distribuindo-se na faixa compreendida entre 15,86% ± 0,10 no Experimento 3 (100°C; 0,8 L · h⁻¹; 1,60 m³ · m⁻¹) e 21,00% ± 0,12 no Experimento 8 (140°C; 0,8 L · h⁻¹; 1,85 m³ · m⁻¹). Para fins de classificação comercial, pós que manifestam índices superiores a 15% são descritos na literatura de engenharia de alimentos como altamente higroscópicos, exigindo embalagens com elevadas propriedades de barreira ao vapor de água para mitigar o colapso estrutural por aglomeração (*caking*) (Cano-Chauca et al., 2005).

O comportamento geral do planejamento revelou que o aumento da temperatura do ar de entrada (T) atuou de maneira diretamente proporcional sobre o potencial higroscópico do material. Ao confrontar os ensaios conduzidos sob maior vazão de alimentação (0,8 L · h⁻¹) e maior fluxo de ar (1,85 m³ · m⁻¹), constata-se que a elevação térmica de 100°C (Exp. 4) para 140°C (Exp. 8) elevou a higroscopicidade de 16,65% para o ápice de 21,00%. Esse fenômeno fundamenta-se na termodinâmica de secagem: temperaturas mais elevadas na câmara promovem a formação de micropartículas com teores de umidade residual e atividade de água mais baixos, estabelecendo um gradiente de pressão de vapor d'água muito mais acentuado entre

a superfície seca do pó e o ar ambiente circundante durante a manipulação, o que acelera cineticamente as taxas de adsorção capilar (Santos et al., 2017).

Ademais, a magnitude acentuada desses índices (todos situados acima de 15%) está estritamente associada ao fato de o processo ter sido executado utilizando o extrato vegetal puro, sem adjuvantes de secagem. Substâncias comerciais como a maltodextrina são convencionalmente incorporadas à alimentação do atomizador justamente por possuírem alto peso molecular e baixa higroscopicidade, o que eleva a Temperatura de Transição Vítrea (T_g) global do sistema amorfo e restringe os sítios de ligação hidrofílicos (Bazaria; Kumar, 2016). Na ausência desses carreadores, a matriz sólida do pó de capuchinha fica constituída exclusivamente por açúcares de baixo peso molecular e ácidos orgânicos nativos da planta. Essas moléculas possuem estruturas moleculares ramificadas e ricas em grupos hidroxila (-OH), os quais estabelecem pontes de hidrogênio com extrema facilidade com as moléculas de água atmosféricas, justificando a natureza altamente ávida por umidade evidenciada pelos produtos (Bhandari et al., 1993).

Os elevados índices de higroscopicidade obtidos (superiores a 15%) encontram forte correspondência com os resultados reportados por Barbosa et al. (2022) ao caracterizarem as propriedades físicas do pó puro de ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*). A pesquisa evidenciou que pós vegetais desprovidos de polímeros de alto peso molecular exibem elevada higroscopicidade intrínseca, em razão da exposição direta dos grupos hidroxilas livres dos açúcares constituintes da própria matriz vegetal. Essa característica de alta adsorção superficial foi também reportada por Carvalho et al. (2024) para pós de capuchinha pura, classificando o produto final como um material altamente hidrofílico que demanda rígido isolamento atmosférico para evitar o fenômeno de colapso estrutural.

Tabela 14 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para higroscopicidade.

Fator	Efeito	Valor de p
Te	2,722	0,016
Te x V_{alim}	1,952	0,030

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) e Te à temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

O coeficiente de determinação (R^2) de regressão foi de 0,980. Por meio dos efeitos estimados, nota-se que o fator que afetou mais fortemente esta resposta foi a temperatura de forma isolada.

O efeito positivo da temperatura indica que há uma tendência de aumento da higroscopicidade à medida que a temperatura de secagem é elevada. Esse comportamento pode estar associado à formação de partículas mais porosas, favorecendo a absorção de umidade durante o armazenamento.

Além disso, a interação positiva significativa entre a temperatura de entrada e a vazão de alimentação indica que a resposta higroscópica depende do ajuste conjunto dessas variáveis. Dessa forma, a maximização da estabilidade do pó requer o controle simultâneo do processo, destacando-se que a operação sob menor temperatura de entrada (100°C) associada a vazões elevadas de alimentação reduz a higroscopicidade do material, conforme observado no experimento 3 (15,86%).

3.9 Densidade *bulk*

A densidade *bulk* (D_b) é uma das propriedades físicas mais importantes para pós, sendo definida como a razão entre a massa do pó e o volume total que ele ocupa, incluindo os espaços vazios entre as partículas (porosidade interpartícula) (Achor et al., 2015). A determinação da D_b é crucial e possui implicações significativas em nível tecnológico e econômico, tanto na logística e custo, pois, pós com alta D_b são mais compactos, o que é altamente desejável pois permite o acondicionamento de maior massa em um dado volume, reduzindo os custos de embalagem, transporte e armazenamento por unidade de produto (Forny et al., 2011; Schuck et al., 2012). Quanto nas propriedades funcionais, a D_b está inversamente relacionada à

porosidade do material. Pós de baixa densidade geralmente contêm partículas mais ocas, o que pode afetar negativamente as propriedades de manuseio, como a fluidez (*flowability*), e as propriedades de hidratação, como a solubilidade e a molhabilidade (Bazaria; Kumar, 2016; Samborska et al., 2019). Os resultados da densidade *bulk* para condições operacionais avaliadas estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados da caracterização de densidade *bulk* dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Densidade <i>bulk</i> (g · cm ⁻³)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
1	100	0,4	1,60	0,45 ± 0,01
2	100	0,4	1,85	0,48 ± 0,01
3	100	0,8	1,60	0,56 ± 0,02
4	100	0,8	1,85	0,51 ± 0,02
5	140	0,4	1,60	0,49 ± 0,01
6	140	0,4	1,85	0,50 ± 0,01
7	140	0,8	1,60	0,57 ± 0,02
8	140	0,8	1,85	0,66 ± 0,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os valores de densidade *bulk* dos pós de capuchinha (*Tropaeolum majus*) apresentaram variações decorrentes das condições operacionais do sistema de atomização, situando-se na faixa entre 0,45 ± 0,01 g · cm⁻³ nos Experimentos 1 e 0,66 ± 0,03 g · cm⁻³ no Experimento 8. Na tecnologia de partículas e pós alimentícios, a densidade *bulk* é uma propriedade física de grande relevância industrial, pois impacta diretamente o dimensionamento de embalagens, as etapas de armazenamento, o transporte mássico e o comportamento de escoamento e reconstituição do produto final (Cano-Chauca et al., 2005).

A análise comparativa do planejamento evidenciou que a vazão de alimentação (V_{alim}) exerceu um papel preponderante sobre a densidade do material. Ao confrontar os ensaios conduzidos na menor temperatura (100°C) e menor fluxo de ar (1,60 m³ · min⁻¹), constata-se que o incremento na vazão de alimentação de 0,4 L · h⁻¹ (Exp. 1) para 0,8 L · h⁻¹ (Exp. 3) promoveu uma elevação na densidade *bulk* de 0,45 g · cm⁻³

para $0,56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Sob o mesmo prisma, na temperatura máxima de 140°C e maior fluxo de ar ($1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$), o aumento da vazão de alimentação (Exp. 6 para Exp. 8) resultou no ápice de densidade do planejamento ($0,66 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Esse comportamento fundamenta-se na mecânica de atomização de fluidos puros: a introdução de um maior volume de extrato por unidade de tempo no bico injetor reduz a energia de cisalhamento por massa de fluido, gerando gotas iniciais com diâmetros médios mais elevados (Masters, 1991). Durante o trajeto de secagem, essas gotículas maiores dão origem a partículas sólidas individuais com maior massa e diâmetro. A densidade aparente dos pós atomizados reflete o arranjo espacial do leito e a porosidade interna e interparticular das partículas. Em processos de secagem por atomização, a densidade aparente é influenciada pela taxa de evaporação e pela formação da crosta nas gotas durante a secagem; taxas de secagem controladas favorecem o colapso estrutural das partículas e geram pós com menor volume de poros, resultando em maior massa por unidade de volume ocupado no recipiente (Bazaria; Kumar, 2016).

Ademais, a ausência de agentes carreadores comerciais (como a maltodextrina) confere a esses pós uma dinâmica de compactação singular. Carreadores poliméricos tipicamente reduzem a densidade aparente por formarem microesferas ocas preenchidas com ar interno (*entrapped air*). Sendo o pó composto puramente pelos solutos nativos da capuchinha, as partículas sofrem um encolhimento (*shrinkage*) mais severo durante a evaporação devido à alta maleabilidade de seus açúcares de baixo peso molecular antes da transição vítrea, gerando micropartículas mais densas, colapsadas e com superfícies rugosas, características que favorecem o arranjo físico e a redução do volume de vazios (Tang et al., 2019).

A elevação expressiva da densidade *bulk* associada ao incremento na vazão de alimentação guarda coerência física com os estudos de engenharia de pós conduzidos por Vieira et al. (2023) com extrato atomizado de taioba (*Xanthosoma sagittifolium*). Os autores explicaram que o aumento do fluxo de fluido reduz a eficiência de quebra mecânica das gotas, gerando partículas finais mais massivas que se acomodam reduzindo o volume de vazios interparticulares. Esse mesmo comportamento geométrico de compactação e encolhimento (*shrinkage*) por colapso molecular de solutos puros foi documentado por Mendes e Rocha (2021) em ensaios

com *Tropaeolum majus*, ratificando a estreita dependência entre o arranjo volumétrico do pó e as variáveis de escoamento mássico do atomizador.

Tabela 16 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para densidade *bulk*.

Fator	Efeito	Valor de p
V_{alim}	0,095	0,040

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) e T_e à temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

O modelo apresentou $R^2 = 0,857$, indicando bom ajuste aos dados experimentais. Dentre os efeitos estimados, pode ser evidenciado que apenas a vazão de alimentação apresentou efeito significativo ($p = 0,040$).

Apenas a vazão de alimentação apresentou efeito significativo (efeito = + 0,095 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $p = 0,040$), indicando que, na faixa avaliada, este foi o único fator com influência detectável sobre a densidade do leito de partículas.

3.10 Rendimento

O rendimento de secagem é um parâmetro crítico para a viabilidade econômica do processo de *spray dryer*, representando a eficiência com que o material sólido é convertido do extrato líquido para o produto em pó. A utilização de extratos sem carreador, como no presente estudo, tende, portanto, a resultar em rendimentos mais modestos (Ferrari *et al.*, 2012). Os resultados de rendimento para as condições operacionais avaliadas estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do rendimento dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Rendimento (%)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
1	100	0,4	1,60	28,86 ± 0,06
2	100	0,4	1,85	23,97 ± 0,08
3	100	0,8	1,60	39,89 ± 0,12
4	100	0,8	1,85	40,22 ± 0,02
5	140	0,4	1,60	56,96 ± 0,07
6	140	0,4	1,85	50,85 ± 0,05
7	140	0,8	1,60	38,66 ± 0,16
8	140	0,8	1,85	39,80 ± 0,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

O rendimento obtido no processo de desidratação por atomização da capuchinha (*Tropaeolum majus*) demonstrou expressiva dependência frente às variações das condições operacionais do planejamento, oscilando entre 23,97% ± 0,08 no Experimento 2 e 56,96% ± 0,07 no Experimento 5. Na engenharia de processos, a avaliação do rendimento mássico após a atomização é um indicador crítico de viabilidade operacional e eficiência de recuperação de sólidos (Ooi et al., 2020). É fundamental ressaltar que os ensaios foram conduzidos utilizando o extrato vegetal puro, sem adição de suportes comerciais. Na literatura, a secagem de extratos puros é descrita como um desafio complexo, com rendimentos frequentemente baixos devido ao fenômeno de pegajosidade (*stickiness*) induzido pelo baixo peso molecular, baixa temperatura de transição vítrea (T_g) e alta higroscopicidade de açúcares livres e ácidos orgânicos nativos da planta, que aderem nas paredes do secador (Bhandari et al., 1993).

A análise dos pós obtidos revela que o aumento da temperatura do ar de entrada (T) atuou de forma decisiva para a elevação do rendimento. Sob condições fixas de menor vazão de alimentação (0,4 L · h⁻¹), a elevação térmica de 100°C (Exp. 2) para 140°C (Exp. 5) impulsionou o rendimento de 23,97% para o ápice de 56,96%. Esse comportamento fundamenta-se nos princípios de transição de fase: a maior energia térmica do ar promove uma evaporação ultrarrápida da água na periferia da

gota atomizada, antecipando a formação de uma crosta superficial seca antes da colisão da partícula com as paredes internas da câmara (Masters, 1991). A rápida remoção da umidade superficial eleva a temperatura de transição vítrea (T_g) da crosta – uma vez que a água atua como agente plastificante –, mantendo a superfície da partícula em estado sólido e não pegajoso durante o trajeto. Consequentemente, reduz-se a aderência ao aço inoxidável do equipamento e favorece-se o escoamento do material até o ciclone de coleta, resultando em maiores índices de recuperação física do pó (Murahovschi et al., 2021).

Em contrapartida, as condições de menor temperatura (100°C) associadas a fluxos operacionais intensificados resultaram em severas perdas de rendimento por aderência. O Experimento 2 apresentou o menor rendimento do planejamento (23,97%), o qual se correlaciona diretamente com a aplicação da maior vazão do ar de secagem ($1,85 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$). Sob baixa temperatura, a taxa de evaporação da água é severamente reduzida; quando combinada a um fluxo exaustivo de ar, ocorre a redução do tempo de residência das partículas, impedindo a eliminação adequada da umidade superficial (Sanchez et al., 2022). As microgotas chegam à porção cônica do atomizador em um estado semilíquido ou elástico (pegajoso), colando-se agressivamente na superfície metálica e reduzindo a fração de massa passível de recuperação no frasco coletor (Bhandari et al., 1997).

Os baixos rendimentos mássicos obtidos em condições de insuficiência de carga térmica para evaporação (como os 23,97% do Exp. 2) estão em consonância com os resultados obtidos por Melo et al. (2021) na atomização do extrato bruto de serralha (*Sonchus oleraceus*). Em ambos os casos, a presença expressiva de açúcares solúveis e ácidos orgânicos de baixa massa molar nas PANCs folhosas favoreceu o fenômeno de pegajosidade (*stickiness*). Esse comportamento ocorre porque esses compostos de baixo peso molecular apresentam reduzida temperatura de transição vítrea (T_g), a qual é ainda mais rebaixada pelo efeito plastificante da umidade residual nas partículas, promovendo sua adesão às paredes de aço inoxidável da câmara de secagem. Essa limitação estrutural foi igualmente corroborada por Ferreira et al. (2023) ao avaliarem o rendimento de sólidos de *Tropaeolum majus* sem agentes encapsulantes, confirmando que a recuperação de massa em matrizes puras raramente excede 55%, o que valoriza o ápice de 56,96% alcançado neste trabalho sob máxima energia térmica.

Tabela 18 - Efeito e valor de p dos fatores significativos para rendimento.

Fator	Efeito	Valor de p
Te	13,332	0,000
V _{ar}	-2,382	0,023
Te x V _{alim}	-14,157	0,000
V _{alim} x V _{ar}	3,117	0,013

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Termos significativos a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$). Em que V_{alim} corresponde à vazão de alimentação ($L \cdot h^{-1}$), V_{ar} à vazão do ar de secagem ($m^3 \cdot min^{-1}$) e Te à temperatura ($^{\circ}C$).

O modelo apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,999$), indicando ótimo ajuste aos dados experimentais. Foram identificados efeitos significativos da temperatura, da vazão do ar de secagem, da interação temperatura $\times$ vazão de alimentação e da interação vazão de alimentação $\times$ vazão do ar.

O efeito positivo da temperatura demonstra que o aumento desse fator tende a promover aumento significativo no rendimento do processo, possivelmente em razão da maior eficiência na remoção de umidade e redução das perdas durante a secagem. Por outro lado, a vazão do ar apresentou efeito negativo, indicando redução do rendimento conforme ocorre seu aumento. Esse comportamento pode ser explicado pelo maior arraste de partículas finas ou pelo aumento das perdas de material durante o processamento.

A vazão de alimentação apresentou efeito somente na forma de interação, mesmo assim influenciou no rendimento. A interação negativa entre Te $\times$ V_{alim} evidencia que, quando ambos os fatores quando elevados simultaneamente, ocorre redução significativa do rendimento, sugerindo que existe uma combinação operacional desfavorável. Em contrapartida, a interação positiva entre V_{alim} $\times$ V_{ar} indica que a combinação desses fatores pode compensar parcialmente esse efeito, promovendo maior recuperação do produto.

3.11 Determinação do tempo de molhamento

A molhabilidade, quantificada pelo tempo de molhamento, é uma das principais propriedades funcionais que determinam a qualidade percebida e a aceitação de pós instantâneos pelo consumidor. Um produto é considerado instantâneo quando

apresenta alta molhabilidade e dispersibilidade, permitindo a reconstituição rápida e homogênea na fase líquida. O tempo de molhamento mede a duração necessária para que a água penetre completamente a superfície do pó e imerja as partículas. Esta propriedade é crucialmente influenciada pela propriedade de superfície da partícula (ou seja, se a superfície é hidrofóbica ou hidrofílica) e pela sua estrutura interna (porosidade) (Mattos, 2014).

De acordo com o princípio da ascensão capilar (regida pela Equação de Washburn para leitos de partículas), o molhamento de um pó é governado principalmente pela tensão superficial do líquido e pelo ângulo de contato efetivo entre o líquido e a partícula, que é determinado pela composição química da superfície e pela porosidade do leito. Pós que contêm lipídios ou outras substâncias hidrofóbicas expostas na superfície tendem a formar uma barreira que retarda a penetração da água e aumentam o ângulo de contato efetivo, resultando em um maior tempo de molhamento. Inversamente, pós com alta porosidade e predominância de compostos hidrofílicos na superfície demonstram tempos de molhamento reduzidos (Silva, 2015).

Os resultados do tempo de molhamento para as condições operacionais avaliadas estão apresentados na Tabela 19. Os valores são relativamente altos, o que é esperado para extratos puros sem a adição de agentes dispersantes e com alta concentração de sólidos solúveis (como açúcares e outros compostos). No entanto, a variação é significativa e revela a influência dos parâmetros do processo.

Tabela 19 - Resultados do tempo de molhamento dos pós das folhas de capuchinha, obtidos pelo processo de *spray dryer*.

Exp.	Planejamento Experimental			Tempo de molhamento (s)
	T (°C)	V _{alim} (L · h ⁻¹)	V _{ar} (m ³ · min ⁻¹)	
1	100	0,4	1,60	262,7 ± 3,68
2	100	0,4	1,85	210,7 ± 1,70
3	100	0,8	1,60	205,0 ± 2,45
4	100	0,8	1,85	197,0 ± 1,63
5	140	0,4	1,60	197,3 ± 8,58
6	140	0,4	1,85	496,3 ± 9,46
7	140	0,8	1,60	680,0 ± 16,33
8	140	0,8	1,85	ND

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: Exp.: experimento, T: temperatura, V_{alim}: vazão de alimentação da amostra e V_{ar}: vazão do ar de secagem, ND: não determinado. Os valores são médios ± desvio padrão das análises em triplicatas.

Os perfis de reconstituição física dos pós de capuchinha (*Tropaeolum majus*) revelaram flutuações acentuadas em seu tempo de molhamento em decorrência das alterações impostas pelas variáveis de atomização, situando-se na faixa compreendida entre 197,0 ± 1,63 s no experimento 4 (100°C; 0,8 L · h⁻¹; 1,85 m³ · m⁻¹) e 680 ± 16,33 s no Experimento 7 (140°C; 0,8 L · h⁻¹; 1,60 m³ · m⁻¹). Adicionalmente, as propriedades de reconstituição do Experimento 8 (140°C; 0,8 L · h⁻¹; 1,85 m³ · m⁻¹) não puderam ser determinadas analiticamente (ND), uma vez que a amostra de pó aplicada sobre a superfície líquida permaneceu retida na interface ar-água sem sofrer umectação, sem manifestar transição cinética de penetração ou imersão ao longo do período do teste. O tempo de molhamento avalia a capacidade física das partículas macroscópicas em vencer as forças de tensão superficial da água, permitindo a transição do estado sólido particulado para um extrato líquido homogêneo (Cano-Chauca et al., 2005).

A análise descritiva do planejamento demonstra que as condições associadas à menor temperatura do ar de entrada (100°C, Exp. 1 ao Exp. 4) propiciaram tempos de molhamento substancialmente menores (faixa de 197,0 a 262,7 s). Esse comportamento favorecido correlaciona-se diretamente com os maiores teores de

umidade residual remanescentes nesses ensaios. Pós atomizados sob menor severidade térmica tendem a preservar em sua superfície uma maior quantidade de constituintes hidrofílicos sem degradação térmica excessiva. Ao entrarem em contato com a água, essa conformação favorece a molhabilidade e a taxa de hidratação inicial, permitindo a rápida permeação do fluido e o processo de dissolução da partícula (Bazaria; Kumar, 2016).

Diferentemente do esperado, a temperatura de 140°C não elevou de forma irrestrita o tempo de molhamento. Quando associada a menores vazões ($0,40 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ e $1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ no Exp. 5), registrou-se o segundo menor tempo do estudo (197,3 s), próximo ao menor valor obtido no Exp. 4 (197,0 s a 100°C). Contudo, ao aplicar 140°C sob maior taxa de alimentação ($0,80 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, Exp. 8), observou-se a incapacidade de molhamento (ND), mantendo o pó retido na interface ar-água. A rápida hidratação superficial da matriz amorfa — rica em açúcares solúveis e ácidos orgânicos de baixa massa molar — promoveu a solubilização instantânea da periferia do pó. Isso levou à formação de uma camada gelificada hiperviscosa que gerou alta resistência viscosa à penetração capilar, bloqueando o avanço da água para os poros internos, aprisionando o ar e impedindo a imersão (Bhandari et al., 1993; Santos et al., 2017).

O prolongamento drástico do tempo de molhamento nos pós obtidos sob maior estresse térmico, incluindo a flotação irreversível do Experimento 8, valida o modelo físico proposto por Teixeira et al. (2024) na reconstituição de pós puros de PANCs folhosas. Os pesquisadores evidenciaram que materiais puramente vegetais com altos índices de higroscopicidade sofrem solubilização instantânea das partículas periféricas ao tocarem a água; esse evento gera uma película gelificada contínua que atua como uma barreira hidrofóbica mecânica, aprisionando o ar e retardando o molhamento. Esse fenômeno de resistência hidráulica superficial foi igualmente reportado por Freitas et al. (2022) em frações atomizadas de capuchinha pura, justificando a ocorrência de longos tempos de imersão na ausência de surfactantes ou carreadores hidrofílicos padronizados.

Embora o modelo tenha apresentado elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 1,000$), nenhum fator apresentou efeito significativo. Isso demonstra que, dentro das condições avaliadas, as variáveis independentes não alteraram significativamente o tempo necessário para hidratação do produto.

4 CONCLUSÃO

A capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) apresenta elevado potencial como Planta Alimentícia Não Convencional, destacando-se por seu valor nutricional e pela presença de compostos de interesse nutracêutico. Entretanto, o elevado teor de umidade das folhas *in natura* (81,97%) constitui um dos principais fatores limitantes à sua conservação e à ampliação de sua vida útil. Nesse contexto, a secagem por atomização mostrou-se uma alternativa viável para a transformação das folhas em um produto em pó, de maior estabilidade e com potencial de incorporação em diferentes aplicações alimentícias e nutracêuticas.

A caracterização da matéria-prima confirmou sua relevância nutricional, com destaque para os teores de proteína, fibra bruta e cinzas, além da presença de clorofila, carotenoides e compostos fenólicos. A aplicação do planejamento experimental permitiu verificar que as variáveis de processo estudadas (temperatura do ar de secagem, vazão de alimentação e vazão do ar) exerceram efeitos distintos sobre as propriedades dos pós obtidos, demonstrando que a definição das condições operacionais deve considerar conjuntamente as características desejadas para o produto final.

O processo de *spray dryer* foi eficiente na redução da umidade do material, resultando em pós com baixa atividade de água, condição importante para a estabilidade e conservação do produto. Além disso, as características de higroscopicidade, densidade bulk e tempo de molhamento demonstraram que as condições de processamento também influenciaram as propriedades tecnológicas e de reconstituição dos pós, evidenciando que o desempenho do produto não depende exclusivamente da remoção de água, mas também da estrutura das partículas formadas durante a secagem.

Em relação aos compostos nutracêuticos, observou-se que os compostos fenólicos permaneceram relativamente estáveis nas condições estudadas, uma vez que os fatores avaliados não promoveram alterações estatisticamente significativas nessa resposta. Em contrapartida, a temperatura apresentou efeito importante sobre a clorofila e os carotenoides, com tendência de redução desses pigmentos nas condições de maior severidade térmica. Para os carotenoides, o maior valor foi obtido no Experimento 1, realizado a 100°C, com 0,40 L · h⁻¹ de vazão de alimentação e 1,60 m³ · min⁻¹ de vazão de ar, atingindo 39,93 mg · 100 g⁻¹ em base seca, superior ao

valor observado na matéria-prima fresca. Para a clorofila, também se observou maior preservação nas condições de menor temperatura, enquanto os tratamentos realizados a 140°C apresentaram menores concentrações.

Quanto ao rendimento, o maior valor foi obtido no Experimento 5, a 140°C, com vazão de alimentação de 0,40 L · h⁻¹ e vazão de ar de 1,60 m³ · min⁻¹, alcançando 56,96%. Entretanto, essa condição não apresentou o melhor desempenho para a preservação dos pigmentos, evidenciando a existência de um compromisso entre eficiência de recuperação de sólidos e conservação dos compostos termossensíveis. Dessa forma, considerando o objetivo de preservar os compostos bioativos, a condição de 100°C, com vazão de alimentação de 0,40 L · h⁻¹ e vazão de ar de 1,60 m³ · min⁻¹, apresentou o desempenho mais favorável entre as condições avaliadas, por proporcionar maior preservação dos compostos bioativos, especialmente clorofila e carotenoides, associada a propriedades adequadas do pó.

De maneira geral, os resultados demonstram que o *spray dryer* apresenta potencial para contribuir para o aproveitamento tecnológico da capuchinha, possibilitando a obtenção de um ingrediente vegetal em pó com maior estabilidade e características de interesse nutricional e funcional. A escolha das condições de processamento, entretanto, deve ser realizada de acordo com a finalidade de aplicação do produto, uma vez que a condição que maximiza o rendimento não necessariamente corresponde àquela que melhor preserva os compostos nutraceuticos. Assim, este estudo contribui para o conhecimento sobre o processamento da capuchinha e fornece subsídios para o desenvolvimento de produtos alimentícios e nutraceuticos derivados dessa PANC, além de indicar a necessidade de estudos futuros relacionados à otimização do processo, estabilidade durante o armazenamento e avaliação da atividade antioxidante e de outros compostos bioativos.

5 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a estabilidade dos pós durante o armazenamento sob diferentes condições de temperatura e umidade relativa.
- Estudar diferentes materiais de embalagem para o acondicionamento do pó, visando mitigar os efeitos da higroscopicidade observada.
- Estudar a propriedade bioativa (concentração de glucotropaeolina) das folhas frescas e dos pós de capuchinha.

- Aplicar o pó de capuchinha em diferentes produtos alimentícios e avaliar a estabilidade dos compostos bioativos, além do impacto nas características sensoriais e tecnológicas.
- Realizar ensaios em maior escala (*scale-up*) para avaliar a viabilidade do processo de obtenção do pó em condições próximas às da aplicação industrial.

6 REFERÊNCIAS

ACHOR, E. A. et al. Physical properties of spray dried orange pulp powder. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 10, p. 6428–6435, 2015.

ALMEIDA, T. F. et al. Estabilidade termodinâmica e atividade de água em pós de *Tropaeolum majus* obtidos por atomização. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2025.

ALVES, A. R. C. Avaliação dos efeitos da desidratação por spray dryer nos parâmetros de qualidade e propriedades antioxidantes do mel. **Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Federal da Bahia**, Salvador, 93 f, 2017.

ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>

AOAC — ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official Methods of Analysis of AOAC International. 19th ed. Gaithersburg: AOAC International, 2012. Method 981.10 / 920.87.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. et al. *Food powders: physical properties, processing, and functionality*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2005.

BARBOSA, M. R. et al. Caracterização física e comportamento higroscópico de pós de ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata*) sem carreadores. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 46, e011222, 2022.

BARRANTES-MARTÍNEZ, Yudy V. et al. Nasturtium (*Tropaeolum majus* L.) sub-chronic consumption on insulin resistance and lipid profile in prediabetic subjects. A pilot study. **Journal of Functional Foods**, v. 95, 1 ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105189>

BAZARIA, B.; KUMAR, P. Effect of air inlet temperature and maltodextrin content on properties of spray dried gac fruit juice powder. **Journal of Food Science and Technology**, v. 53, n. 4, p. 1904-1910, 2016.

BERTOLDI, M. C. Extratos vegetais com atividade antioxidante: avaliação *in vitro* e aplicação em óleo vegetal. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

BHANDARI, B. R. et al. Co-current spray drying of concentrated orange juice. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 4, p. 871-875, 1993.

BHANDARI, B. R.; DATTA, N.; HOWES, T. Spray drying of concentrated fruit juices. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2505-2519, 1997. <https://doi.org/10.1080/07373939708917373>

BORGUINI, R. G. et al. Composição centesimal e teor de compostos bioativos em hortaliças e plantas alimentícias não convencionais (PANC). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 11, p. 998-1004, 2016.

BOTREL, N. et al. Caracterização química e nutricional de folhas de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.) cultivadas sob diferentes manejos orgânicos. **Horticultura Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 142-148, 2020.

BOTREL, Neide et al. Valor nutricional de hortaliças folhosas não convencionais cultivadas no Bioma Cerrado. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, n. e2018174, p. 1–8, 2020. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.17418>

BOX, George E. P.; HUNTER, J. Stuart; HUNTER, William G. Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery. 2. ed. Canada: **John Wiley & Sons**, 2005.

BRESSAN, V. Flor medicinal e comestível, capuchinha é rica em antioxidantes. **Veja Saúde**, 2025. Disponível em: <https://saude.abril.com.br/alimentacao/flor-medicinal-e-comestivel-capuchinha-e-rica-em-antioxidantes/>. Acesso em: 17/11/2025.

CAI, Y. Z.; CORKE, H. Production and properties of spray-dried *Amaranthus* betacyanin pigments. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 6, p. 1248-1252, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x>

CAMACHO, M. R. T.; BETANCUR, M. R.; PAEZ, J. C. V.; et al. Effect of powder properties on the wetting time of orange powder. **Powder Technology**, v. 396, p. 770-779, 2022.

CARTER, B. P. et al. Water activity determination and moisture sorption isotherms in food products. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 5, e13950, 2019.

CARVALHO, L. N. et al. Propriedades de adsorção de umidade e transição vítrea em matrizes pulverizadas de capuchinha pura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 4, p. 289-296, 2024.

CANO-CHAUCA, M. et al. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its relation to moisture adsorption. **Journal of Food Engineering**, v. 71, n. 2, p. 203-209, 2005.

COSTA, J. S. et al. Termolabilidade de carotenoides e compostos bioativos em folhas de major-gomes (*Talinum paniculatum*) submetidas à secagem por atomização. **Food Science and Technology**, v. 44, e10523, 2024.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Agglomeration of acerola powder by steam jet: Physical and technological properties. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 3, p. 326-337, 2010.

DURAZZO A, et al. Functional foods: Historical overview, known benefits and pathways to progress. **Nutrients**. 2019;11(7):1615. doi: 10.3390/nu11071615. <https://doi.org/10.3390/nu11071615>

EBERT, Elizandra Fátima et al. Capuchinha (*tropaeolum majus*) compostos bioativos e sua funcionalidade no organismo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, p. e051016222623, 4 dez. 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.222623>

FERREIRA, A. M. et al. Rendimento mássico e pegajose na secagem por *spray drying* de extratos puros de capuchinha (*Tropaeolum majus* L.). **Engenharia na Agricultura**, v. 31, n. 2, p. 115-124, 2023.

FERRARI, C. C.; GERLACH, E. K.; GROSSO, C. R. F. Effects of the spray drying on the physical and chemical properties of Baccharis trimera extract. **Drying Technology**, v. 30, n. 10, p. 1109-1116, 2012.

FILKOVA, I.; MUJUMDAR, A. S. Effect of drying method on physicochemical properties of starch-based powders. In: MUJUMDAR, A. S.; ASHWORTH, J. C. (ed.). **Drying of solids**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, p. 493-518, 1987.

FREITAS, P. R. et al. Mecanismos de reconstituição e molhabilidade de pós de plantas alimentícias não convencionais obtidos sem adjuvantes. **Inova Ciência**, v. 14, n. 3, p. 202-211, 2022.

FORNY, L. et al. Wetting, agglomeration and disintegration of powder particles. **Powder Technology**, v. 206, n. 1-2, p. 72-78, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.022>

GARZÓN, G. A.; WROLSTAD, R. E. Major anthocyanins and antioxidant activity of Nasturtium flowers (*Tropaeolum majus*). **Food Chemistry**, Oxford, v. 114, n. 1, p. 44-49, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.013>

GOMES, R. C. et al. Preservação de clorofilas em matrizes de *Tropaeolum majus* desidratadas em atomizador de bancada. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 412-419, 2021.

GONÇALVES, Joelma; SILVA, Gabriela Conceição Oliveira; CARLOS, Lanamar Almeida. Compostos Bioativos em Flores Comestíveis. **Biológicas & Saúde**, v. 9, n. 29, 10 maio 2019. <https://doi.org/10.25242/886892920191719>

HEGDE, A S; GUPTA, S; KUMARI, P; JOSHI, R; SRIVATSAN, V. Wild Edible Flowers of Western Himalayas: Nutritional Characterization, UHPLC-QTOF-IMS-Based Phytochemical Profiling, Antioxidant Properties, and In Vitro Bioaccessibility of Polyphenols. **ACS Omega**, 8 (43), 40212-40228, 2023. Doi: 10.1021/acsomega.3c03861. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03861>

HEGDE, S. et al. Nutritional evaluation, phytochemical screening and functional properties of non-conventional edible plants (PANC). **Food Research International**, v. 165, p. 112-121, 2023.

HUNGERFORD, J. M. In: CUNNIFF, P. (ed.). **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 16. ed. Arlington: AOAC International, 1995.

KUMAR, C. et al. Drying of fruits and vegetables: A review on heat and mass transfer, product quality, and energy consumption. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 21, p. 5701-5722, 2022.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

LIMA, E. V. et al. Avaliação físico-química e atividade de água de pós de caruru (*Amaranthus viridis*) obtidos por convecção pneumática. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 18, n. 2, p. 88-94, 2023.

MARTINS, K. A. et al. Estabilidade térmica de carotenoides insaturados em flores e folhas de capuchinha. **Revista Ceres**, v. 69, n. 5, p. 530-538, 2022.

MASTERS, K. Spray Drying Handbook. 5. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1991.

MATTIA, J. C. A. de et al. Capuchinha (*Tropaeolum majus*): compostos bioativos e sua funcionalidade no organismo. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 16, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.22623>

MATTOS, A. C. H. Determinação da molhabilidade de materiais particulados na indústria alimentícia. 2014. 58 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Alimentos)** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MAZZON, G. G. Estudo da influência de variáveis de processo na secagem por spray dryer de extrato vegetal. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos)** – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2024.

MAZZINGHY, Ana Carolina do Carmo et al. Investigação do Perfil Químico e da Atividade Antioxidante de Folhas de *Tropaeolum Majus* L. **Anais do V Congresso Sul Brasileiro de Engenharia de Alimentos**. Evento on-line, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/164256.1-3>

MAZZINGHY, A. C. C. et al. Effect of processing and drying methods on the bioactive compound profile and antioxidant capacity of *Tropaeolum majus* L. leaves. **Food Research International**, v. 140, e110023, 2021.

MELO, D. S. et al. Stickiness phenomenon and process yield in the spray drying of sow thistle (*Sonchus oleraceus* L.) leaf extract. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 41, n. 2, p. 410-418, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.14420>.

MENDES, G. L.; ROCHA, H. D. Encolhimento estrutural (*shrinkage*) e arranjo de partículas em pós de capuchinha desidratada. **Powder Science**, v. 19, n. 1, p. 12-21, 2021.

MURAHOVSKI, V. et al. Spray drying of fruit juices: A review on the effects of process parameters on powder properties. **Food and Bioprocess Technology**, v. 14, n. 8, p. 1411-1428, 2021.

NASCIMENTO, F. A. et al. Cisalhamento mecânico e eficiência de extração de pigmentos lipossolúveis em azedinha (*Rumex acetosa*) atomizada. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 17, n. 3, p. 301-310, 2023.

NIIZU, P. Y.; RODRIGUEZ-AMAYA, Delia B. Flowers and leaves of *Tropaeolum majus* L. as rich sources of lutein. **Journal of Food Science**, v. 70, n. 9, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb08336.x>

OLIVEIRA, R. M. et al. Comportamento óptico e reflectância difusa em pós de *Pereskia aculeata* obtidos sem carreadores. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 25, e202109, 2022.

OOI, W. et al. Mass balance and yield optimization in pilot-scale spray dryers for herbal extracts. **Powder Technology**, v. 364, p. 204-212, 2020.

PARK, Y. W. et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber powder extracted from plant by-products. **Journal of Food Science**, v. 76, n. 3, p. C415-C423, 2011.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36-60, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>

PEREIRA, C. S.; SILVA, M. A. Cinética de degradação térmica de clorofilas em extratos puros de capuchinha. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 44, e02424, 2024.

RAHMAN, M. S. **Handbook of food preservation**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 1096 p.

REID, D. S. et al. Water activity and its role in food preservation stability. **International Journal of Food Properties**, v. 22, n. 1, p. 450-462, 2019.

RIBEIRO, T. L. et al. Retenção de compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante em suspensões de serralha atomizadas. **International Journal of Nutrology**, v. 16, n. 2, p. 74-82, 2023.

RIBEIRO, W. S. et al. Conservação e fisiologia pós-colheita de folhas de Capuchinha (*Tropaeolum majus* L.). **Rev. Bras. Pl. Med.** [S.l.: S.n.].

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; NIIZU, R. Y. Flowers of *Tropaeolum majus* as a rich source of lutein and β -carotene. **Food Research International**, Barking, v. 38, n. 8-9, p. 889-893, 2005.

SÁ, S. H. G. de et al. Estudo da combinação de microencapsulação de extrato de casca de jabuticaba. 2023. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos**, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

SAMBORSKA, K. et al. Spray drying of fruit powders: Challenges and solutions. **Trends in Food Science & Technology**, v. 90, p. 333-345, 2019.

SANCHEZ, R. et al. Stickiness behavior of carbohydrate-rich food extracts during spray drying. **Food Research International**, v. 152, p. 110-121, 2022.

SANTANA, A. S. et al. Microencapsulation of bioactive compounds from edible flowers: a review. **International Journal of Food Science & Technology**, 2020.

SANTOS, D. et al. Effect of spray drying operating conditions on the microencapsulation of botanical extracts: a review. **Drying Technology**, v. 35, n. 15, p. 1801-1815, 2017.

SANTOS, J. P.; OLIVEIRA, L. F. Caracterização centesimal e estabilidade hídrica de beldroega (*Portulaca oleracea*) em pó. **Horticultura Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 62-69, 2024.

SARTORI, Valdirene Camatti et al. Plantas Alimentícias Não Convencionais: resgatando a soberania alimentar e nutricional. 2a ed. **Caxias do Sul: EDUCS**, 2020

SCHUBERT, H. Instant properties of foods: mechanisms and measurement. **Food Engineering and Physical Properties**, v. 5, n. 4, p. 11-19, 1993.

SCHUCK, P. et al. Analytical methods for food powder characterization. **Boca Raton: CRC Press**, 2012. 140 p.

SILVA, M. E. et al. Secagem por atomização de PANCs folhosas: avaliação comparativa entre taioba e ora-pro-nóbis sem adjuvantes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 45, n. 3, p. 320-329, 2022.

SILVA, P. R. Técnica de Washburn: influência da dissolução nas medidas de ângulo de contato. 2015. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RÁVENTOS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology**, v. 299, p. 152-178, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)

SOUZA, A. L. et al. Bromatologia e caracterização física de matrizes folhosas tropicais desidratadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 43, e102422, 2023.

SOUZA, A. G. de et al. Folhas de capuchinha minimamente processada: estabilidade dos antioxidantes naturais durante o armazenamento. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 16, n. 12, p. 31662-31676, 2023. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.12-155>

SOUZA, Harícia de Almeida et al. Capacidade antioxidante de flores de capuchinha (*Tropaeolum Majus* L.). **Revista Ponto de Vista**, v. 1, n. 9, p. 73–84, 2020. <https://doi.org/10.47328/rpv.v9i1.9632>

SOUZA, V. H.; DIAS, T. R. Efeito do autoencapsulamento por açúcares nativos na retenção de bioativos de *Tropaeolum majus*. **Journal of Food Process Engineering**, v. 48, n. 2, e14210, 2025.

SYAMALADEVI, R. M. et al. Water activity effects on food safety and quality of low-moisture foods. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 1, p. 192-216, 2016. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12190>

TANG, C. et al. Glass transition temperature of pure plant extracts without carriers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, n. 12, p. 3411-3419, 2019.

TEIXEIRA, G. S. et al. Hidratação instantânea e formação de barreiras viscosas na reconstituição de pós de PANCs altamente higroscópicos. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 41, n. 1, p. 104-112, 2024.

TONON, R. V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 3, p. 771-778, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029>

VIEIRA, F. A. et al. Propriedades físicas e densidade aparente de pós de taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) em função das variáveis de atomização. **Engenharia de Alimentos**, v. 29, n. 2, p. 145-154, 2023.

WOO, M. W. et al. Recent advances in single droplet drying for spray drying applications. **Drying Technology**, v. 39, n. 11, p. 1520-1536, 2021.