



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos



LORRANE SANTOS DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE GRAMA DE TRIGO (*Triticum aestivum L.*) EM SPRAY
DRYER**

Patos de Minas - MG
2025

LORRANE SANTOS DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE GRAMA TRIGO (*Triticum Aestivum L.*) EM SPRAY
DRYER**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador(a): Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana

Coorientador(a):

Prof.^a. Dr.^a Marta Fernanda Zotarelli

Prof.^a. Dr.^a Letícia Rocha Guidi

Patos de Minas - MG

2025

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

O48 Oliveira, Lorrane Santos de, 1999-
2025 Secagem de grama de trigo (*Triticum aestivum* L.) em spray
dryer [recurso eletrônico] / Lorrane Santos de Oliveira. - 2025.

Orientador: Ricardo Corrêa de Santana.
Coorientadora: Marta Fernanda Zotarelli.
Coorientadora: Letícia Rocha Guidi.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.577>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Alimentos - Indústria. I. Santana, Ricardo Corrêa de, 1981-,
(Orient.). II. Zotarelli, Marta Fernanda, 1985-, (Coorient.). III. Guidi,
Letícia Rocha, 1984-, (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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Patos de Minas
 Rua Vereador Chico Filgueira, 33, 3º andar, Sala 21 - Bairro Caiçaras, Patos de Minas-MG, CEP 38702-178
 Telefone: (34) 3823-3714 - www.ppgae.feq.ufu.br - coordppgea@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia de Alimentos			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico n. 10/2025 - PPGAE			
Data:	Trinta de setembro de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	42322EAL005			
Nome do Discente:	Lorrane Santos de Oliveira			
Título do Trabalho:	Secagem da grama de trigo (<i>Triticum aestivum L.</i>) 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: Ricardo Correa de Santana (Presidente - Orientador), Fernanda Rezende Abrahão (Membro UFU) e Priscila Bernardes Silva (Membro Externo).

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

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

Aprovada.

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.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Correa de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/09/2025, às 16:30, 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 **Priscila Bernardes Silva, Usuário Externo**, em 30/09/2025, às 16:34, 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 **Fernanda Rezende Abrahão, Professor(a) Substituto(a) do Magistério Superior**, em 30/09/2025, às 16:34, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6674726** e o código CRC **A1D1B14E**.

RESUMO

A grama de trigo é um microverde comumente consumida como suplemento, principalmente na forma de suco processado após a colheita. É uma fonte rica em compostos bioativos com potencial aplicação na indústria alimentícia, entretanto os processos de secagem para conservação da grama de trigo são poucos explorados pela literatura científica. Este trabalho teve como objetivo investigar a produção de grama de trigo em pó por *spray drying* e a influência do tratamento térmico de branqueamento por imersão. Inicialmente foi investigado o efeito do branqueamento com um planejamento fatorial 2^4 , posteriormente a evolução para um planejamento composto central com objetivo de obter modelos matemáticos. Os parâmetros de secagem avaliadas foram temperatura do ar de secagem ($96 - 163^\circ\text{C}$), vazão de alimentação ($0,25 - 0,95 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) e vazão do ar de secagem ($0,95 - 1,65 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$). A grama de trigo utilizada foi colhida com 9 dias de crescimento. Foram realizadas análises físico-químicas de umidade, atividade de água, rendimento, solubilidade, cor, e compostos bioativos (clorofila, carotenoides, compostos fenólicos totais e flavonoides totais). Os resultados demonstraram que o material seco obtido com o branqueamento apresentou, em geral, menores teores de umidade e maiores rendimentos quando comparado com o material que não foi realizado o tratamento térmico. Quanto à cor, as amostras branqueadas apresentaram menor perda da coloração, resultando em partículas mais verdes. O branqueamento contribuiu para maior retenção de pigmentos de clorofila e carotenoides.

PALAVRAS-CHAVE: *Triticum Aestivum L.*; bibliometria; branqueamento; superfície resposta; compostos bioativos; clorofila.

ABSTRACT

Wheatgrass is a microgreen commonly consumed as a supplement, mainly in the form of juice processed after harvesting. It is a rich source of bioactive compounds with potential applications in the food industry, however, drying processes for wheatgrass preservation are rarely explored in scientific literature. This study aimed to investigate the production of wheatgrass powder by spray drying and the influence of thermal treatment by immersion bleaching. Initially, the effect of bleaching was investigated using a 2^4 factorial design, followed by a central composite design to obtain mathematical models. The drying parameters evaluated were drying air temperature ($96\text{-}163^\circ\text{C}$), feed flow rate ($0.25\text{-}0.95 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$), and drying air flow rate ($0.95\text{-}1.65 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$). The wheat grass used was harvested after 9 days of growth. Physical-chemical analyses were performed on moisture content, water activity, yield, solubility, color, and bioactive compounds (chlorophyll, carotenoids, total phenolic compounds, and total flavonoids). The results showed that the dry material obtained from bleaching generally had lower moisture content and higher yields when compared to material that had not undergone heat treatment. In terms of color, the bleached samples showed less color loss, resulting in greener particles. Bleaching contributed to greater retention of chlorophyll and carotenoid pigments.

KEYWORDS: *Triticum aestivum L.*; bibliometrics; blanching; surface response; bioactive compounds; chlorophyll.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	13
CAPÍTULO 2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 COMPOSTOS BIOATIVOS EM ALIMENTOS	14
2.2 GRAMA DE TRIGO	16
2.2.1 Clorofila	18
2.3 ALIMENTOS EM PÓ	20
2.4 SECAGEM DE ALIMENTOS	22
2.4.1 Pré-tratamento na secagem de alimentos aumentar	23
2.5 SPRAY DRYING	24
CAPÍTULO 3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS SOBRE A GRAMA DE TRIGO	26
3.1 INTRODUÇÃO	26
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.2.1 Critério de pesquisa	27
3.2.2 Seleção dos termos descritores	27
3.2.3 Base de dados	27
3.2.4 Análise dos resultados	27
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.3.1 Refino de pesquisa para a grama de trigo utilizada para consumo	28
3.3.2 Evolução temporal das pesquisas no período de 2014 a 2024	32
3.3.3 Palavras-chave	33
3.3.4 Publicações mais citadas	38

3.3.5	Autores e países	41
3.3.6	Periódicos	42
3.3.7	Identificação de estudos de processamento da grama de trigo a partir de indicadores bibliométricos	44
3.4	CONCLUSÃO.....	47
CAPÍTULO 4 SECAGEM DA GRAMA DE TRIGO UTILIZANDO O MÉTODO DE SPRAY DRYING		49
4.1	INTRODUÇÃO	49
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.2.1	Obtenção da grama de trigo.....	51
4.2.1.1	Branqueamento da grama de trigo	54
4.2.2	Preparo das amostras para secagem	55
4.2.3	Secagem utilizando <i>Spray Dryer</i>	56
4.2.4	Planejamento experimental e análise estatística	56
4.2.5	Caracterização físico-química das folhas frescas e do produto em pó	61
4.2.5.1	Determinação da umidade.....	61
4.2.5.2	Atividade de água.....	61
4.2.5.3	Rendimento	62
4.2.5.4	Higroscopideade	62
4.2.5.5	Solubilidade	62
4.2.5.6	Teste de molhamento	63
4.2.5.7	Determinação da densidade bulk	63
4.2.5.8	Cor	63
4.2.5.9	Compostos bioativos	64
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.3.1	Caracterização da grama de trigo fresca e branqueada	66
4.3.2	Secagem da de grama de trigo por <i>spray drying</i>	71

4.3.2.1 Planejamento fatorial 2^4	71
4.3.2.2 Planejamento composto central rotacional	98
4.3.3 Conclusão	139
CAPÍTULO 5 Conclusões gerais.....	141
REFERÊNCIAS	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Grama de Trigo	16
Figura 2.2 - Comparação da estrutura entre: a) clorofila b) hemoglobina.....	19
Figura 2.3 – Esquematização de uma unidade de secagem por <i>spray drying</i>	24
Figura 3.1 - Palavras-chave do autor para 2750 publicações.....	29
Figura 3.2 – Análise de agrupamento realizada pelo CitNetExplore.....	31
Figura 3.3 - Agrupamento de citações a respeito de grama de trigo para consumo.....	32
Figura 3.4 – Evolução temporal das áreas de pesquisa e número de publicações sobre grama de trigo	33
Figura 3.5 - Co-ocorrência de palavras-chave do autor para 254 publicações	34
Figura 3.6 - Análise de tempo do VoSViewer	37
Figura 3.7 - Produção Científica dos Países.....	42
Figura 3.8 - Principais periódicos sobre grama de trigo segundo a lei Bradford	43
Figura 4.1 – Sementes comerciais de trigo utilizadas para cultivo	51
Figura 4.2 – Esquematização do processo de germinação dos grãos de trigos	52
Figura 4.3 – Materiais utilizados no cultivo da grama de trigo, em que: a) Recipiente utilizado para crescimento da grama de trigo, b) Substrato utilizando para cultivo	52
Figura 4.4 - Crescimento da grama de trigo: a) 1 dia, b) 5 dias, c) 9 dias e d) 12 dias.....	53
Figura 4.5 - Grama de trigo embalada para posterior armazenamento em congelador.....	54
Figura 4.6 - Etapas de obtenção da suspensão de grama de trigo, em que: a) no liquidificador, b) etapa de peneiramento, c) suspensão, d) resíduo	55
Figura 4.7 – Esquematização do <i>Spray dryer</i> utilizado para a secagem da grama de trigo	56
Figura 4.8 - Folhas de grama de trigo a) sem branqueamento, b) após realizar o branqueamento.	68

Figura 4.9 – Teor de umidade final dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme o planejamento experimental 2 ⁴	71
Figura 4.10 – Teor de atividade de água dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme o planejamento experimental 2 ⁴	74
Figura 4.11 - Adesão das partículas no equipamento <i>spray dryer</i> : a) câmara de secagem, b) interior do ciclone, c) saída superior do ciclone (<i>overflow</i>)	75
Figura 4.12 - Rendimento do processo de <i>spray drying</i> dos experimentos do planejamento fatorial 2 ⁴	76
Figura 4.13 - Temperatura do ar na saída da câmara de secagem	77
Figura 4.14 - Resultados de higroscopidez dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , de acordo com o planejamento experimental 2 ⁴	79
Figura 4.15 - Resultados de solubilidade dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	81
Figura 4.16 - Visualização dos experimentos de solubilidade para os 16 experimentos.....	82
Figura 4.17 - Resultados de caracterização de <i>L*</i> da grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	83
Figura 4.18 - Resultados de caracterização do parâmetro <i>a*</i> da grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	84
Figura 4.19 - Resultados de caracterização do parâmetro <i>b*</i> da grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	85
Figura 4.20 - Resultados de caracterização do parâmetro <i>C*</i> e <i>h°</i> da grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	87
Figura 4.21 - Resultados do teor de clorofila nos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	90
Figura 4.22 - Resultados do teor de carotenoides nos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	92
Figura 4.23 - Resultados do teor de compostos fenólicos totais nos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	94
Figura 4.24 - Resultados do teor de flavonoides nos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o planejamento experimental 2 ⁴	96
Figura 4.25 - Teor de umidade final dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme PCCR	99

Figura 4.26 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o teor de umidade, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$)); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$)).	100
Figura 4.27 - Atividade de água dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> , conforme o PCCR.....	101
Figura 4.28 - Rendimento de secagem da grama de trigo por <i>spray drying</i> , conforme o PCCR	102
Figura 4.29 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o rendimento, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$)); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	104
Figura 4.30 - Solubilidade dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR	106
Figura 4.31 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para a solubilidade, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$)); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	108
Figura 4.32 - Tempo de molhamento dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR	109
Figura 4.33 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para tempo de molhamento, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	111
Figura 4.34 - Densidade de bulk dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR	113

Figura 4.35 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para densidade de bulk, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	114
Figura 4.36 - Resultados dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR	115
Figura 4.37 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o parâmetro L^* , em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	120
Figura 4.38 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o parâmetro a^* , em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	121
Figura 4.39 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o parâmetro b^* , em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	122
Figura 4.40 - Resultados para h° e c^* dos pós de grama de trigo.	123
Figura 4.41 – Variação global de cor (ΔE^*) dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR.....	124
Figura 4.42 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para variação global de cor (ΔE^*), em função de temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))).	125
Figura 4.43 Fotografia dos pós de grama de trigo obtidos por secagem em <i>spray drying</i> conforme PCCR	126

Figura 4.44 - Resultados de clorofila total dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR.....	127
Figura 4.45 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para concentração de clorofila, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$)); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	128
Figura 4.46 - Resultados de clorofila total dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR.....	130
Figura 4.47 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para concentração de carotenoides, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	132
Figura 4.48 - Resultados de compostos fenólicos totais dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR	134
Figura 4.49 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para concentração de fenólicos totais nos pós, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).	135
Figura 4.50 - Resultados de flavonoides totais dos pós de grama de trigo seca por <i>spray drying</i> conforme PCCR.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição centesimal da grama de trigo.....	17
Tabela 3.1 - As 50 principais palavras-chave do autor	35
Tabela 3.2 - Agrupamentos realizados pelo VOSviewer.....	36
Tabela 3.3 – Classificação dos 20 trabalhos mais citados entre o periodo de 2014 a 2024	38
Tabela 3.4 - Publicações que realizaram o processamento da grama de trigo visando conservação.....	45
Tabela 3.5 - Publicações que utilizaram a grama de trigo como ingrediente na formulação de alimentos	46
Tabela 4.1 - Fatores e níveis investigados no planejamento 2 ⁴	57
Tabela 4.2 - Matriz do planejamento 2 ⁴	58
Tabela 4.3 - Fatores e níveis investigados no planejamento PCCR.....	59
Tabela 4.4 - Matriz do planejamento PCCR.	60
Tabela 4.5 - Caracterização físico-química das folhas de grama de trigo <i>in natura</i> e branqueada.	66
Tabela 4.6 - Efeitos e valores de <i>p</i> para umidade do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	73
Tabela 4.7 - Efeitos e respectivos valores de <i>p</i> para o rendimento de secagem, para a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	78
Tabela 4.8 - Efeitos e valores de <i>p</i> para a higroscopicidade do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	80
Tabela 4.9 - Efeitos e valor de <i>p</i> do para a solubilidade o pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	82
Tabela 4.10 - Efeito e valor de <i>p</i> para os parâmetros de cor L*, a* e b* do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	88
Tabela 4.11 - Efeito e valor de <i>p</i> para o teor de clorofila do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	91
Tabela 4.12 - Efeitos e valor de <i>p</i> para o teor de carotenoides totais do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	93
Tabela 4.13 - Efeito e valor de <i>p</i> para o teor de fenólicos totais do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2 ⁴	95

Tabela 4.14 - Efeito e valor de p para o teor de flavonoides totais do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴.....97

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A grama de trigo, microverde obtido do grão de trigo comum (*Triticum aestivum* L.), destaca-se por sua composição nutricional, incluindo vitaminas, minerais, aminoácidos e compostos com ação antioxidante, que lhe conferem propriedades funcionais. O seu consumo ocorre, principalmente, na forma de suco fresco ou do produto desidratado encontrado em cápsulas ou em pó (Cores Rodríguez *et al.*, 2022; Mishra *et al.*, 2025; Tullo; Abera, 2023).

O consumo do suco da grama de trigo é frequentemente associado a efeitos digestivos, ação desintoxicante e propriedades anti-inflamatórias (Banerjee *et al.*, 2021). Estudos indicam que o consumo do suco de grama de trigo pode auxiliar no tratamento de doenças intestinais, como colite ulcerativa e doença de Crohn (Chauhan, 2014; Sharma *et al.*, 2013; Wan, 2014). Além disso, a grama de trigo é utilizada como terapia auxiliar em casos de anemia, pois a clorofila, pigmento predominante em sua composição, possui estrutura semelhante ao grupo heme da hemoglobina, podendo atuar como substituto em situações de deficiência (Cai *et al.*, 2021). Estudos preliminares também sugerem que a grama de trigo pode reduzir efeitos colaterais da quimioterapia (Avisar *et al.*, 2020a, 2020b).

A grama de trigo é obtida da colheita de folhas de trigo com até 12 dias de crescimento, seguido do processamento para obtenção do suco (Cores Rodríguez *et al.*, 2022; Minocha; Sharma; Pandey, 2021). Entretanto, a grama de trigo é um produto altamente perecível devido ao elevado teor de umidade, o que representa uma limitação para seu uso. Apesar do crescente interesse em propriedades nutricionais e funcionais, os estudos voltados ao processamento e conservação desse microverde ainda são escassos (Chakraborty *et al.*, 2023; Mishra *et al.*, 2025).

Atualmente, os métodos de conservação aplicados para a grama de trigo são o congelamento e a secagem (Cores Rodríguez *et al.*, 2022). Quando congelada, a sua vida útil se estende para até 3 meses; no entanto, mesmo nesse caso, são observadas perdas nutricionais com o tempo de armazenamento sob congelamento (Skoczyłas *et al.*, 2018). Além disso, a aplicação da cadeia do frio durante o processamento e a distribuição impõe desafios operacionais e logísticos, com altos custos associados ao consumo de energia e infraestrutura (Friedman-Heiman; Miller, 2024).

Como alternativa ao congelamento, a secagem tem sido amplamente explorada na conservação de alimentos. A secagem elimina a necessidade de refrigeração, facilita o transporte e armazenamento – levando em conta a redução de peso e volume -, sendo, portanto, uma alternativa mais acessível e viável quando comparada ao congelamento (Dantas *et al.*, 2023). Nesse sentido, a secagem é uma das principais técnicas de conservação que pode aumentar a vida útil da grama de trigo. Métodos como como liofilização, secagem em leito fluidizado, secagem solar, secagem em estufa a vácuo e secagem em estufa convencional foram investigados para aplicação na grama de trigo (Akbas *et al.*, 2017; Devi *et al.*, 2017; Nandita Thakur, 2019; Pardeshi; Burbade; Khod, 2013). De maneira geral, esses estudos mostram que as características do produto, como a preservação de nutrientes, são significativamente influenciadas pelo método de secagem empregado.

Embora existam estudos sobre a secagem da grama de trigo utilizando diferentes métodos, não foram encontradas até o momento pesquisas específicas que explorem a aplicação, nesse material, da secagem por *spray drying* (SD), também conhecida como secagem por atomização ou secagem por pulverização. Esse método consiste em transformar uma matéria-prima líquida (uma solução ou suspensão) em pó por meio da atomização em uma câmara de secagem com ar quente. É amplamente utilizado na indústria para a produção de pós ou partículas, devido, por exemplo, à sua eficiência e capacidade de preservar compostos bioativos, inclusive em processos de larga escala (Dantas *et al.*, 2023; Srivastava *et al.*, 2022).

Além disso, diante do crescente interesse no aproveitamento das potencialidades da grama de trigo, torna-se essencial sintetizar e compreender como esse tema vem sendo abordado na literatura científica, com especial atenção ao métodos de secagem. Nesse contexto, uma revisão bibliométrica se apresenta como uma ferramenta útil para mapear as principais áreas de estudo, identificar lacunas de pesquisa e direcionar investigações futuras, como a otimização de técnicas de secagem e a exploração de novas aplicações para a grama de trigo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo central deste estudo foi investigar a aplicação da secagem por *spray drying* (SD) na produção de grama de trigo em pó e avaliar as propriedades do produto obtido. Os objetivos específicos foram:

- Realizar análise bibliométrica da grama de trigo para mapear a literatura sobre o assunto.
- Estudar a aplicação de branqueamento, como pré-tratamento à secagem, nas folhas de grama de trigo.
- Caracterizar a grama de trigo *in natura* (em suspensão), com e sem branqueamento, em relação à umidade, atividade de água, cor e compostos bioativos.
- Investigar o efeito das condições operacionais de secagem, temperatura do ar de secagem, vazão de entrada do ar de secagem, vazão da alimentação da suspensão, tratamento térmico de branqueamento por imersão, no rendimento do processo e nas características físico-químicas dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, como, umidade, hidroscopicidade, atividade de água, solubilidade, cor e compostos bioativos.

CAPÍTULO 2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COMPOSTOS BIOATIVOS EM ALIMENTOS

Os compostos bioativos são substâncias presentes em pequenas quantidades nos alimentos que, embora não sejam nutrientes essenciais como vitaminas ou minerais, exercem efeitos benéficos à saúde. Eles podem ter propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas e até anticarcinogênicas. Esses compostos podem ser de origem vegetal (fitoquímicos), como os flavonoides presentes em frutas e vegetais; de origem animal, como ômega-3, ou ainda produzidos artificialmente. Devido a essas propriedades funcionais, os compostos bioativos têm sido amplamente estudados pela ciência dos alimentos e seu consumo impulsionado (Shen *et al.*, 2022).

Os fitoquímicos são metabólitos secundários produzidos pelas plantas como mecanismo de interação com o ambiente, são classificados em três principais grupos conforme sua estrutura: compostos fenólicos, terpenos e compostos nitrogenados (Shen *et al.*, 2022).

Os terpenos são majoritariamente encontrados em óleos essenciais, e em carotenoides (que são classificados como tetraterpenóides). Os carotenoides são pigmentos que fornece coloração laranja as plantas. Terpenos são estruturas de uma ou mais unidades de isopreno de cinco carbonos (Nabi *et al.*, 2023).

Os compostos nitrogenados classificados como bioativos são betalaínas, e alcalóides. As betalaínas, são pigmentos violeta, solúveis em água encontrados principalmente em frutas. Já os alcalóides são compostos com efeitos estimulantes ou alucinógenos produzidas pelas plantas principalmente como mecanismo de defesa, os mais conhecidos são nicotina e cafeína (Nabi *et al.*, 2023).

Os compostos fenólicos atuam principalmente como antioxidantes, agem neutralizando diretamente os radicais livres e formando complexos estáveis com íons metálicos oxidantes. São compostos fenólicos: flavonóides (flavonas, flavonóis, antocianidinas, flavanonas e isoflavonóides), ácidos fenólicos (ácido gálico, ácido salicílico, ácido ferúlico), estilbenos (resveratrol, sintetizado apenas em resposta a

infecções ou lesões) e lignanas (constituintes de parede celular que auxiliam a formação da lignina) (Nabi *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2022).

Os pigmentos naturais são compostos bioativos responsáveis pela coloração de diversas plantas, embora também possam estar presentes em alguns animais, como alguns peixes e crustáceos que acumulam carotenoides por meio da dieta. São pigmentos naturais as clorofilas, os carotenoides, as antocianinas e as betalaínas (Nabi *et al.*, 2023). A clorofila, pigmento verde presente nas folhas, possui uma estrutura central com um átomo de magnésio ligado a um anel porfirínico, o que lhe confere capacidade de captar luz solar e participar da fotossíntese. No organismo humano atua como antioxidante e agente desintoxicante (Pérez-Gálvez; Viera; Roca, 2020). Já os carotenoides, conferem cores do amarelo ao vermelho, como o betacaroteno, licopeno, luteína e zeaxantina, são lipossolúveis com longas cadeias de duplos ligações conjugadas. Além disso, alguns carotenoides têm função provitamina A como o betacaroteno (Nabi *et al.*, 2023; Pérez-Gálvez; Viera; Roca, 2020).

Nos últimos anos plantas com elevado teor de compostos bioativos têm recebido crescente atenção do mercado consumidor atraindo pesquisas científicas. Essa valorização está relacionada à busca por alimentos naturais com propriedades funcionais, capazes de contribuir para a prevenção de doenças crônicas e para a manutenção da saúde (Choe; Yu; Wang, 2018; Niroula *et al.*, 2019).

Entre as fontes de maior interesse destacam-se algas como chlorella e spirulina, além de brotos e microverdes, geralmente consumidos na forma de sucos, pós ou extratos. Nesse contexto, a grama de trigo (*wheatgrass*) tornou-se popular como suplemento alimentar devido ao seu perfil bioativo. Suas folhas contêm uma ampla variedade de compostos benéficos, incluindo vitaminas, minerais, compostos fenólicos, flavonoides e pigmentos como clorofila e carotenoides. Essa composição diversificada confere à grama de trigo propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e desintoxicantes, tornando-a um alimento funcional de interesse na promoção da saúde (Cores Rodríguez *et al.*, 2022; Mishra *et al.*, 2025; Tullo; Abera, 2023).

2.2 GRAMA DE TRIGO

A grama de trigo (Figura 2.1) consiste na fase inicial da planta do grão de trigo comum (*Triticum aestivum L.*), colhida para consumo entre 7 e 15 dias de crescimento (Mishra *et al.*, 2025; Skoczylas *et al.*, 2018). O consumo ocorre, principalmente, na forma de suco, processando-se as folhas imediatamente após a colheita. O cultivo pode ser em horta ao ar livre, em estufas ou dentro de casa em bandejas, sendo esta última forma a mais comum (Clyde-Smith; Campos, 2023; Sharma; Thakur; Dhaliwal, 2019; Xu *et al.*, 2022).

Figura 2.1 - Grama de Trigo



Fonte: arquivo pessoal.

A grama de trigo é classificada como microverde, denominação utilizada para plantas jovens que são colhidas após a fase inicial de brotamento, geralmente com até duas semanas de idade (Niroula *et al.*, 2019). O valor nutricional dos microverdes é atribuído às altas concentrações de nutrientes, que estão maiores na fase inicial de brotamento e crescimento folhear. Nesse estágio as plantas estão em acelerado desenvolvimento metabólico e, assim, possuem uma concentração maior de nutrientes (Choe; Yu; Wang, 2018).

Na composição da grama de trigo são encontrados nutrientes como vitaminas (A, complexo B, C, E), minerais (cálcio, fósforo, magnésio; potássio, zinco); enzimas (amilase, citocromo oxidase, lipase, protease, superóxido dismutase, trans-hidrogenase) e aminoácidos (ácido aspártico, treonina e lisina) (Ghumman; Singh;

Kaur, 2017; Minocha; Sharma; Pandey, 2021; Moshawih *et al.*, 2022; Sharma; Thakur; Dhaliwal, 2019; Tullo; Abera, 2023). Na Tabela 2.1 é visualizada a composição centesimal da grama de trigo.

Tabela 2.1 - Composição centesimal da grama de trigo

Parâmetro	Grama de trigo
Matéria seca (g/100 g)	9 - 13
Proteína bruta (% em matéria seca)	31,0
Gordura bruta (% em matéria seca)	14,0
Carboidratos total (% em matéria seca)	50,5
Cinzas (% em matéria seca)	4,5
Fibra bruta (% em matéria seca)	22,5

Fonte: adaptado de Mirsha *et al.*, (2025); Chonchan e Skocylas *et al.*, (2018).

A valorização da grama de trigo é devido, principalmente, à predominância de clorofila, sendo os efeitos benéficos desse composto para a saúde um estímulo para o consumo (Bar-Sela *et al.*, 2015; Gore; Palaskar; Bartake, 2017). Por participar da fotossíntese, a clorofila apresenta um elevado potencial antioxidante, sendo benéfica quando é consumida, pois ajuda a neutralizar radicais livres. Além disso, ainda é reportada na literatura sua capacidade de formar complexos estáveis com substâncias carcinogênicas, auxiliando na sua eliminação do organismo (Cai *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2013).

Os benefícios da grama de trigo são associados a composição de clorofila e polifenóis como ácidos fenólicos e flavonoides, compostos estes com ações antioxidantes (Moshawih *et al.*, 2022). Ainda é reportado que a grama de trigo contém prebióticos naturais, como frutanos e arabinoxilanios, que promovem o crescimento da microbiota intestinal, importante para manter o equilíbrio e a saúde intestinal (Moshawih *et al.*, 2022). A ação antioxidante da grama de trigo é frequentemente relacionada ao alívio de sintomas de doenças inflamatórias intestinais como colite ulcerativa e doença de Crohn, o que impulsiona muitos estudos com sua aplicação (Sharma *et al.*, 2013; Tamraz; Al Ghossaini; Temraz, 2024; Tullo; Abera, 2023).

O apelo anticarcinogênico da grama de trigo se baseia em estudos que demonstraram que os extratos podem inibir a ativação metabólica de substâncias cancerígenas, reduzindo assim a possibilidade de formação de tumores. Essa propriedade está associada a composição de clorofila (Avisar *et al.*, 2020b, 2020a;

Aydos *et al.*, 2011; Banerjee *et al.*, 2021; Bar-Sela *et al.*, 2007; Clement *et al.*, 2016; Das *et al.*, 2014; Ekambaram *et al.*, 2022; Tamraz; Al Ghossaini; Temraz, 2024).

O uso da grama de trigo como suplemento teve início por volta dos anos de 1930 nos Estados Unidos. No entanto, sua popularização ocorreu apenas nos anos 1980, impulsionada por movimentos que defendiam a alimentação natural como forma de tratamento e prevenção de doenças crônicas. Apesar de ser considerada uma novidade no ocidente, a grama de trigo já é amplamente conhecida em países asiáticos, como China e Índia, valorizada por suas propriedades nutricionais (Durairaj *et al.*, 2014a; Wigmore, 1985; Złotek *et al.*, 2019).

Apesar de não explicitar a expressão grama de trigo, estudos que investigam as propriedades bioquímicas da grama de trigo são datados desde 1978. Nos estudos de Lai, (1979) e Lai, Dabney e Shaw, (1978) foi utilizada uma metodologia baseada no uso de brotos e folhas do grão de trigo germinado com 12 dias. Lai et al. (1978) investigaram o potencial de brotos de plantas, incluindo a grama de trigo, para inibir a ativação metabólica de substâncias cancerígenas. Como resultados, os autores reportaram que os extratos avaliados demonstraram potencial para inibição da ativação dos compostos estudados. Dando continuidade à pesquisa, Lai (1979) analisou se o teor de clorofila presente nos brotos de trigo, que era elevado, contribuía para essa atividade inibitória, uma vez que já se conhecia da literatura o papel funcional da clorofila. Ao extrair a clorofila, o autor observou que nos extratos a atividade inibitória estava diretamente relacionada ao seu conteúdo.

Mais tarde os estudos de Peryt *et al.*, (1992), demonstraram que a atividade antimutagênica dos extratos da grama de trigo também estava associada ao conteúdo de flavonoides. Identificou-se que o efeito inibitório era atribuído presença de apigenina, um flavonoide conhecido por suas propriedades antimutagênicas e anticarcinogênicas.

2.2.1 Clorofila

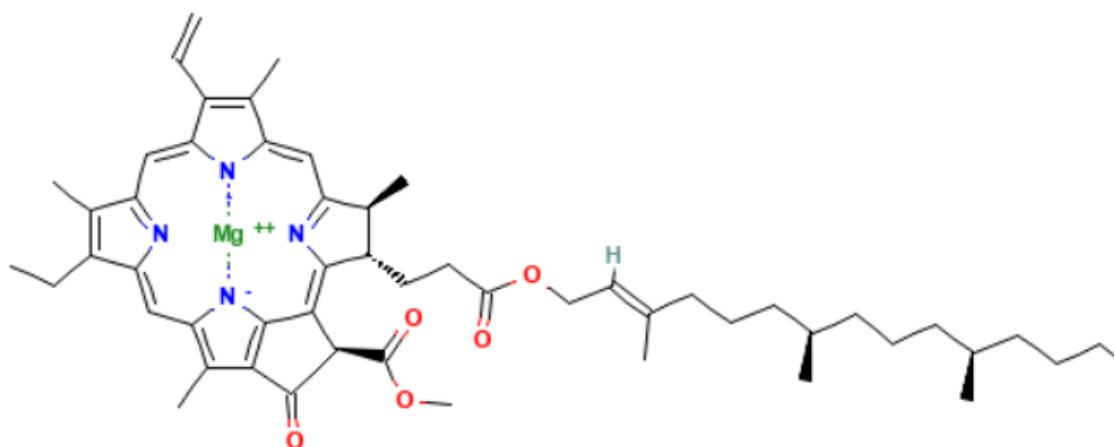
As clorofilas são reconhecidas por suas propriedades regenerativas para o sangue, podendo atuar como substituto da hemoglobina em casos anemia (Gore; Palaskar; Bartake, 2017). É atribuído ainda efeito desintoxicante, pois se liga a metais

pesados e facilita sua eliminação do organismo (Minocha; Sharma; Pandey, 2021; Tamraz; Al Ghossaini; Temraz, 2024).

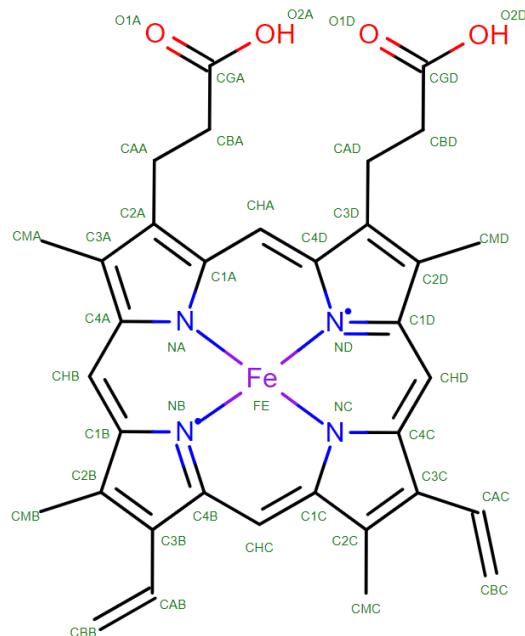
As clorofilas representam uma categoria de pigmentos presente em plantas, algas e cianobactérias, desempenhando um papel fundamental na fotossíntese, permitindo que as plantas absorvam a energia da luz e a converta em energia química (Nabi *et al.*, 2023). As clorofilas são classificadas em seis grupos (a, b, c, d, e, f), sendo apenas os tipos “a” e “b” presentes em plantas. Os demais grupos são encontrados em algas e bactérias (Cai *et al.*, 2021; Nabi *et al.*, 2023). A clorofila “a” é a principal responsável pela fotossíntese, atuando diretamente na conversão de energia luminosa em energia química. Por sua vez, a clorofila “b” auxilia a clorofila “a”, absorvendo comprimentos de onda que esta não consegue captar, ampliando a eficiência da captação de luz. A clorofila a difere da clorofila b pela presença de um grupo metil (-CH₃) e carbonila (-CHO) (Hayes; Ferruzzi, 2020).

Estruturalmente a clorofila apresenta semelhança com a hemoglobina, sendo composta por um anel de tetrapirrol com um átomo de magnésio no centro, semelhante ao grupo heme da hemoglobina, onde o átomo central é o ferro. Além disso, contém um grupo fitila esterificado, responsável por sua característica hidrofóbica (Figura 2.2). Uma alternativa solúvel à clorofila é a clorofilina de cobre e sódio, produzida a partir da saponificação da clorofila (Nabi *et al.*, 2023; Ramesh; Muthuraman, 2018).

Figura 2.2 - Comparaçao da estrutura entre: a) clorofila b) hemoglobina
a)



b)



Fonte: PubChem.

A degradação da clorofila ocorre quando o íon de Mg^{+2} na estrutura é eliminado, o que ocorre quando exposta a altas temperaturas e a condições ácidas, resultando em uma mudança de cor de verde vibrante para verde-oliva, que é comumente observada em vegetais cozidos, como na ervilha. A clorofilase, enzima que degrada a clorofila, é ativada dentro de uma faixa de temperatura de 60 a 82°C. No entanto, acima de 100°C, essa enzima é degradada, o que sugere que o processamento em alta temperatura pode inativá-la, prevenindo assim a degradação da clorofila em compostos menos desejáveis, como feofitinas e feofórbidos (Hayes; Ferruzzi, 2020; Ramesh; Muthuraman, 2018). Para inativar a ação enzimática e consequente preservação da cor, tratamentos térmicos, como o branqueamento, apresentam grande eficácia (Severini *et al.*, 2016).

2.3 ALIMENTOS EM PÓ

O consumo de alimentos em pó e/ou partículados tem aumentado em todo o mundo devido à sua praticidade de uso, segurança alimentar e capacidade de armazenamento prolongado. Alimentos em pós não são produzidos apenas para o consumidor direto, o uso de ingredientes secos na indústria, como ovos, laticínios e

temperos proporciona padronização e melhoria na qualidade do processo produtivo (Juarez-Enriquez *et al.*, 2017; Selomulya; Fang, 2013).

Umidade e atividade de água são dois parâmetros utilizados para descrever propriedades físico-químicas em pós. A umidade indica a quantidade total de água na matriz, representada por gramas de água por grama de sólidos secos (ou sólido úmido), enquanto a atividade da água, informa sobre como essa água se liga à matriz do pó (água ligada ou não ligada água) (Juarez-Enriquez *et al.*, 2017).

A higroscopicidade dos pós corresponde a capacidade deles de adsorver água do ambiente (Juarez-Enriquez *et al.*, 2017). Uma forma de classificá-los é baseada na quantidade de água adsorvida: pós não higroscópicos não aumentam a umidade após armazenados por uma semana em ambiente com umidade relativa abaixo de 90%, pós moderadamente higroscópicos adsorvem entre 10 e 30% do seu peso, e muito higroscópicos aqueles que adsorvem mais de 30% do seu peso (Callahan *et al.*, 1982).

Na maioria dos casos, os alimentos em pó destinam-se à reidratação. Propriedades de reidratação instantânea são desejáveis para permitir que os pós umedeçam e se dispersem rapidamente sem formar caroços ou sedimentos (Juarez-Enriquez *et al.*, 2017). A estabilidade dos alimentos em pó é dependente dos fatores ambientais, como temperatura e umidade relativa do ar, podendo resultar em fenômenos indesejáveis, como pegajosidade (*stickiness*) e/ou empedramento (*caking*), tanto durante a produção quanto no armazenamento (Hartmann; Palzer, 2011).

A obtenção de alimentos em pó pode ser realizada por diferentes métodos de secagem, como secagem em leito fluidizado, secagem a vácuo e, principalmente, a secagem por atomização, conhecida como *spray drying*. Este último é amplamente utilizado na indústria por permitir a transformação direta de suspensões ou soluções em pó, sem a necessidade de etapas posteriores de moagem, ao contrário de outros métodos que secam o alimento em pedaços maiores ou em pastas, exigindo Trituração para obtenção do pó final (George *et al.*, 2023). Uma das grandes vantagens do *spray drying* é o rápido tempo de residência das partículas na câmara de secagem o que minimiza a exposição ao calor e, consequentemente, reduz a degradação térmica de compostos sensíveis. Isso favorece a preservação de características sensoriais importantes, como sabor, aroma e cor, além de conservar propriedades nutricionais

como vitaminas termossensíveis (como a vitamina C), proteínas e compostos bioativos (Pui; Saleena, 2022).

2.4 SECAGEM DE ALIMENTOS

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas de conservação de alimentos. Durante o processo, ocorre a redução do teor de água e da atividade de água nos alimentos, tornando o ambiente desfavorável para o crescimento de microrganismos e inibindo reações químicas deteriorantes que normalmente acontecem em meio aquoso. A remoção de umidade acontece por meio de processo simultâneo de transferência de massa e calor (Pui; Saleena, 2022; Srivastava *et al.*, 2022).

O processo de secagem ocorre principalmente em dois estágios: um período de evaporação de taxa constante seguido por um período de evaporação de taxa decrescente (Zahoor *et al.*, 2023). Inicialmente se tem um pré-aquecimento do alimento para igualar a temperatura do alimento ao meio de secagem. Na sequência, durante o período de taxa constante, a evaporação ocorre na superfície externa do material para a remoção da umidade não ligada (água livre). O período de secagem a taxa constante termina com um teor de umidade crítico, a partir do qual a superfície do material já não se encontra totalmente saturada em água. Então, inicia-se o período de secagem a taxa decrescente, caracterizado pela migração de umidade do interior para a superfície. Nesse período a taxa de secagem diminui porque a água no interior do produto é lentamente transportada para a superfície (com um aumento gradual da temperatura), antes de evaporar para o meio externo. Assim, os efeitos de difusão e capilaridade controlam essa taxa de secagem decrescente (Zahoor *et al.*, 2023). O período da taxa decrescente prevalece até atingir o teor de umidade final desejado ou a umidade de equilíbrio (Zahoor *et al.*, 2023).

Durante a secagem de alimentos pode ocorrer perda do valor nutricional e alterações de atributos sensoriais como a cor, textura, aroma e sabor. No entanto, os avanços tecnológicos no processo de secagem têm contribuído para reduzir esses efeitos indesejáveis, permitindo a obtenção de produtos secos com melhor preservação das características nutricionais e sensoriais, além de propriedades físico-

químicas e tecnológicas que resultem em produtos de qualidade global (Dantas *et al.*, 2023; George *et al.*, 2023).

A escolha do método de secagem é influenciada pelas propriedades do material a ser seco (forma, tamanho de partícula, cor, possíveis alterações de sabor, e valor nutricional), afetando as características que se deseja preservar. Assim, é buscado o melhor desempenho de secagem: menores custos operacionais, maior qualidade do produto e maiores rendimentos (Dantas *et al.*, 2023).

A secagem pode ser feita com métodos simples, como secagem natural ao sol, em estantes à sombra ou em estufas, e usando métodos mais complexos como leito fluidizado, atomização, micro-ondas e radiação infravermelha. Além disso, tem crescido a utilização de métodos combinados alternativos como secagem assistida por ultrassom e secagem híbrida com métodos combinados (infravermelho com ar quente, infravermelho a vácuo, secagem por micro-ondas a vácuo) (Dantas *et al.*, 2023).

2.4.1 Pré-tratamento na secagem de alimentos aumentar

Os pré-tratamentos são processos aplicados aos alimentos antes da secagem com o objetivo de aumentar a eficiência e a qualidade do produto. Podem ser métodos físicos (como branqueamento térmico ou ultrassom), métodos químicos (uso de antioxidantes, sais ou ácidos) ou combinados (Deng *et al.*, 2019; Oliveira; Brandão; Silva, 2016).

Os pré-tratamentos servem principalmente para inativar enzimas que causam degradação de nutrientes como a polifenol oxidase, reduzir a carga microbiana inicial e facilitar a remoção de água. Além disso, pode contribuir para a otimização do processo de secagem, ao promover modificações estruturais nos tecidos vegetais que facilitam a remoção de água (Deng *et al.*, 2019; Oliveira; Brandão; Silva, 2016).

O branqueamento térmico é um pré-tratamento comumente usado no processamento de vegetais e frutas. Envolve a aplicação de calor eficaz na inativação de enzimas que promovem escurecimento. Pode ser realizado por imersão ou a exposição ao vapor quente, mas deve-se evitar exposição excessiva ao calor ou

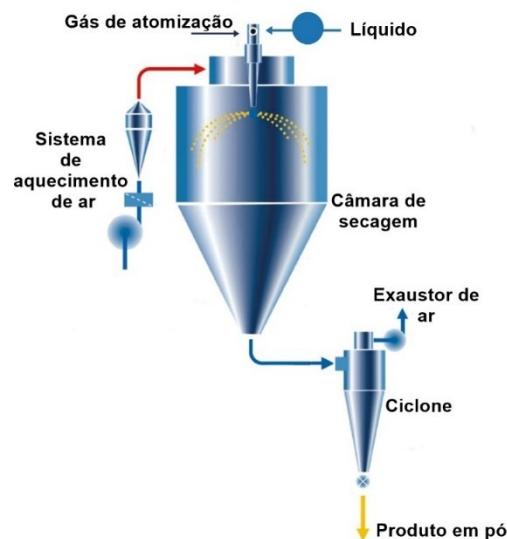
lixiviação com o contato com a água, o que pode levar a uma perda de nutrientes (Deng *et al.*, 2019; Oliveira; Brandão; Silva, 2016).

2.5 SPRAY DRYING

A secagem por *spray drying* possibilita a produção direta de pós de granulometria fina. Além de ser utilizado para secagem, esse equipamento é empregado no encapsulamento de óleos essenciais e de microrganismos (Dantas *et al.*, 2023).

O funcionamento do equipamento ocorre de forma que uma formulação líquida (solução ou suspensão) a ser seca é injetada por uma bomba e dispersa na câmara de secagem. Essa dispersão ocorre por meio de um bico pulverizador que fraciona o líquido em minúsculas gotas através de uma corrente de ar comprimido. Essas gotículas entram em contato com o gás de entrada (gás quente, geralmente ar), resultando nos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa, responsáveis pela evaporação do líquido. Então, a mistura ar quente mais sólido seco é direcionada a um ciclone onde ocorre a separação sólido-gás, coletando material particulado em recipiente específico no orifício de *inferior* desse dispositivo (Dantas *et al.*, 2023; Srivastava *et al.*, 2022). O sistema de secagem por atomização é esquematizado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Esquematização de uma unidade de secagem por *spray drying*



Fonte: adaptado de Pisecky (2012).

A qualidade e características do produto final são influenciadas diretamente pelas condições operacionais e variáveis do processo. As principais variáveis são: concentração de alimentação, temperatura e vazão do ar de secagem, e tipo do atomizador que pode ser por uso de ar comprimido ou através de discos rotativos (Dantas *et al.*, 2023; Srivastava *et al.*, 2022). O processo de secagem por atomização é rápido, o tempo de contato da amostra com o ar quente varia geralmente entre 5 e 100 s, e em temperaturas relativamente altas, geralmente acima de 100°C (Dantas *et al.*, 2023).

CAPÍTULO 3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS SOBRE A GRAMA DE TRIGO

3.1 INTRODUÇÃO

Com o interesse pelas propriedades funcionais da grama de trigo, torna-se necessário realizar um mapeamento da literatura científica buscando compreender como o tema vem sendo abordado. Uma revisão bibliométrica surge como uma ferramenta para mapear a literatura e identificar lacunas que podem orientar estudos futuros sobre o assunto, como novas possibilidades de processamento e aplicação da grama de trigo (Donthu *et al.*, 2021).

Uma revisão bibliométrica ou bibliometria consiste na análise quantitativa de publicações, utilizando de métodos de análise de parâmetros bibliométricos como análise de desempenho (identificação dos principais autores, instituições, países, áreas temáticas e periódicos) e mapeamento científico que consiste na avaliação em como as publicações se relacionam, como análise de citação e análise de palavras-chave (Donthu *et al.*, 2021).

Neste estudo, foi realizada uma revisão bibliométrica sobre a grama de trigo. A análise teve como objetivo uma visão geral da pesquisa sobre a grama de trigo a partir de publicações indexadas no *Web of Science Core Collection* (WoS) da *Clarivate Analytics*. A partir dos dados foram identificados os trabalhos mais relevantes, principais áreas temáticas relacionadas ao assunto, autores, instituições e países que conduzem pesquisas sobre a grama de trigo.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização de uma análise bibliométrica foram seguidas etapas de seleção dos critérios de pesquisa, sendo eles definição dos termos descritores, base de dados e filtros de pesquisa (Donthu *et al.*, 2021).

3.2.1 Critério de pesquisa

A busca foi realizada na seção de pesquisa avançada na *Web of Science*, utilizando o critério “Tópico”, que restringe a busca dos termos de pesquisa aos títulos, resumos, palavras-chave do autor e nas palavras-chave extra dos artigos. A análise focou exclusivamente em publicações científicas, como artigos de pesquisa e de revisão, portanto, outros tipos de documento foram excluídos e nenhum filtro de idioma foi aplicado.

3.2.2 Seleção dos termos descritores

Durante a análise de combinações de palavras-chave para pesquisa foi identificado que tanto na forma de “wheatgrass” ou “wheat grass” são encontrados trabalhos referentes ao objetivo de pesquisa, grama de trigo utilizada para consumo. Desta forma, a fórmula final de pesquisa foi: TS= (“wheatgrass” or “wheat-grass”). O nome científico não foi inserido visto também ser verificado que alguns trabalhos informavam como “*T. aestivum*” ou “*Triticum A.*” e que resultava em exclusão de trabalhos quando inserido uma forma específica.

3.2.3 Base de dados

A coleta de dados foi realizada em publicações científicas indexadas na base de dados *Web of Science Core Collection*©. O acesso ao WoS foi realizado através do portal *Periódicos CAPES*, disponibilizado pelo governo do Brasil. Todas as edições da *Core Collection* disponíveis foram selecionadas: *Science Citation Index Expanded* (SCI-EXPANDED); *Social Sciences Citation Index* (SSCI); *Arts & Humanities Citation Index* (AHCI); *Conference Proceedings Citation Index – Science* (CPCI-S); *Conference Proceedings Citation Index – Social Science & Humanities* (CPCI-SSH) e *Emerging Sources Citation Index* (ESCI).

3.2.4 Análise dos resultados

Para análise dos resultados foram utilizadas ferramentas internas do WoS, como a opção de “Análise dos resultados”. Além disso, os resultados também foram exportados e analisados nos softwares bibliométricos VOSviewer© (versão 1.6.20),

pacote bibliometrix do R, CitNetExplorer (versão 1.0.0) e Microsoft® Excel® (Versão 2403).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

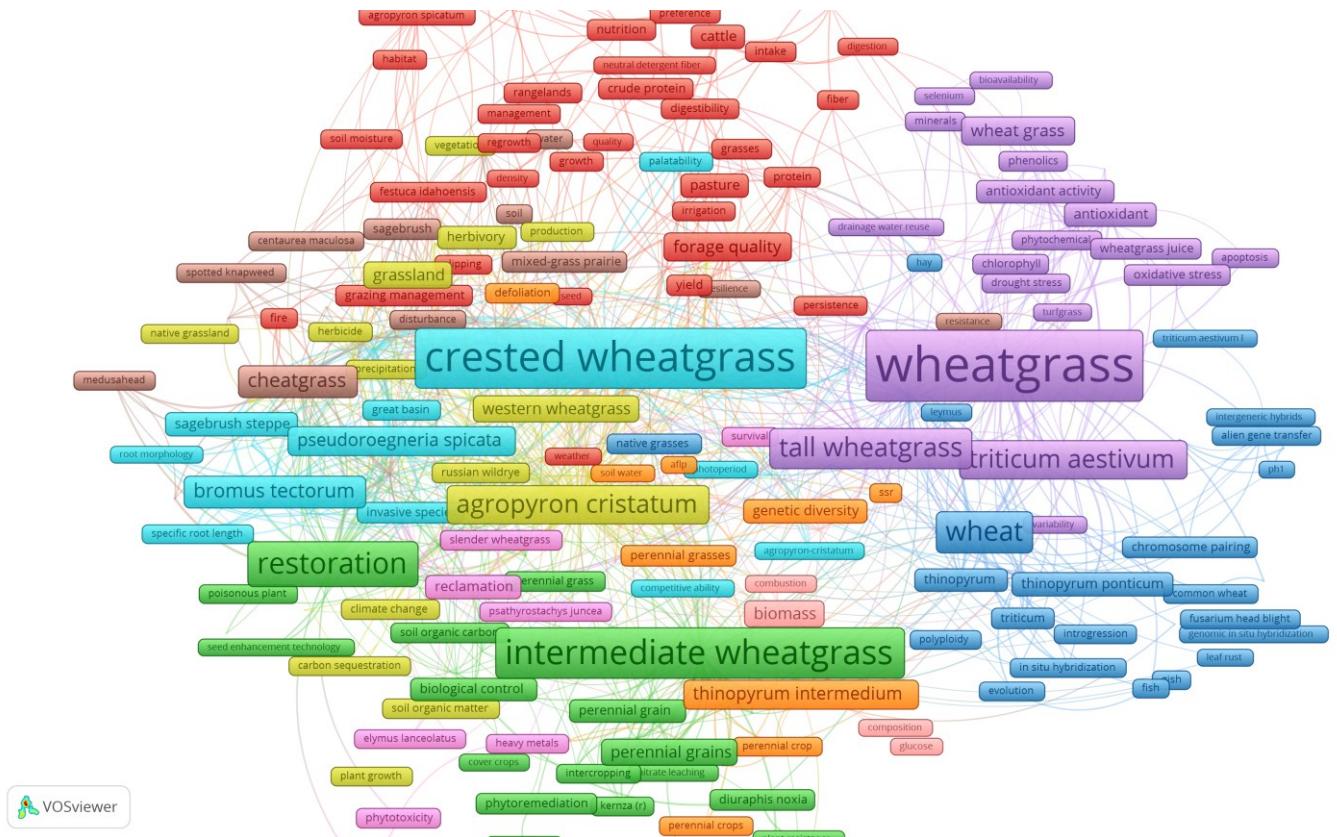
3.3.1 Refino de pesquisa para a grama de trigo utilizada para consumo

Esta seção tem como objetivo descrever o refinamento da amostra inicialmente obtida, visando uma melhor análise dos resultados relacionados à grama de trigo utilizada para consumo. A busca foi realizada em maio de 2025, e a fórmula de pesquisa TS= ("wheatgrass" or "wheat-grass") resultou em um total de 3121 publicações. Após a aplicação do filtro para incluir apenas artigos de pesquisa e de revisão, a amostra foi reduzida para 2881 publicações, abrangendo o período de 1945 a 2025. Os dados foram exportados e uma análise exploratória inicial foi realizada utilizando os softwares CitNetExplorer e VOSviewer.

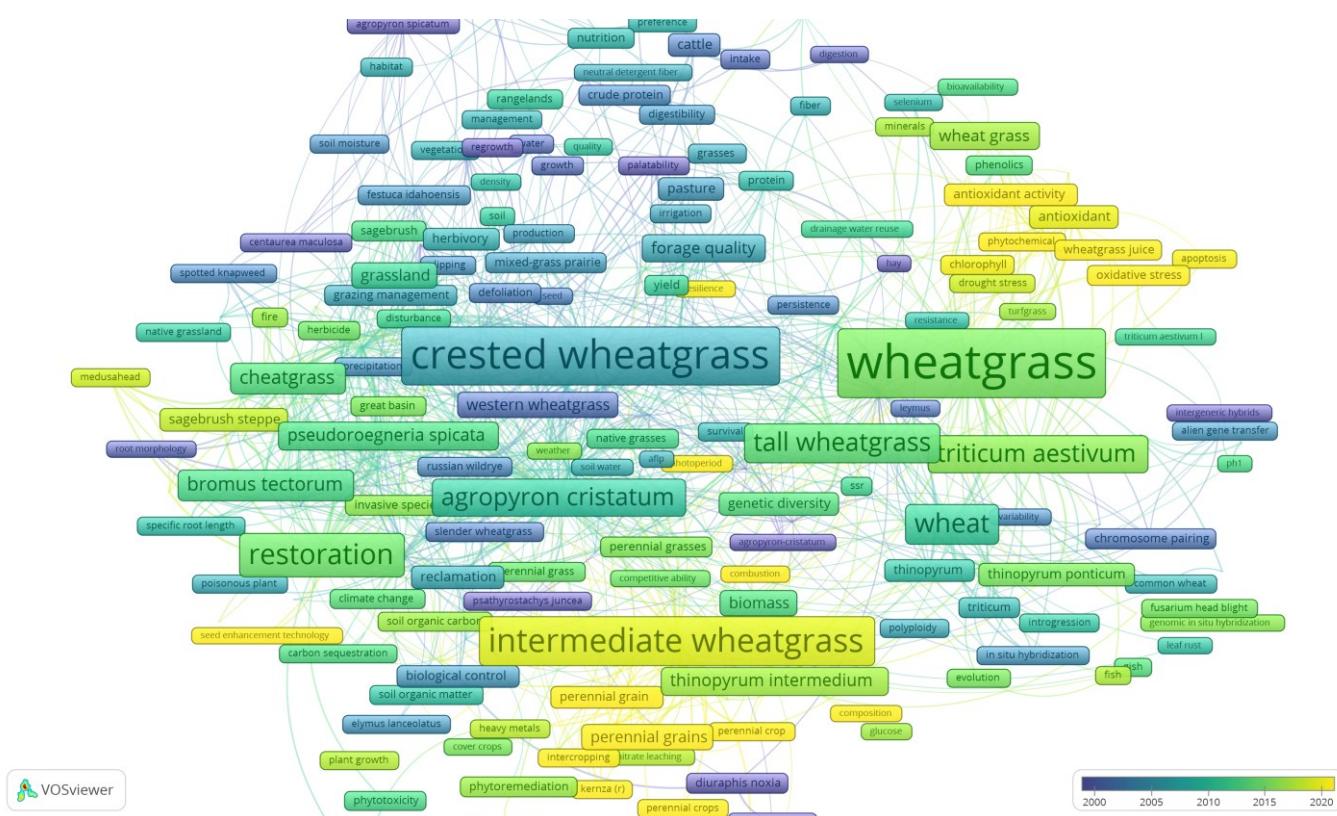
O VOSviewer é um *software* amplamente utilizado para análise bibliométrica. Ele fornece um mapa de relacionamento de documentos científicos, medindo a proximidade entre itens para indicar sua relação. No mapa gerado, as palavras são agrupadas com base nas conexões que fazem, quanto maior o número de conexões de uma palavra, maior será sua representação visual. Na Figura 3.1a são apresentadas as palavras-chave dos autores que tiveram ocorrência mínima de 5 vezes, totalizando 301 itens.

Figura 3.1 - Palavras-chave do autor para 2750 publicações

a) Visualização de cluster



a) Visualização temporal



Fonte: dados da pesquisa.

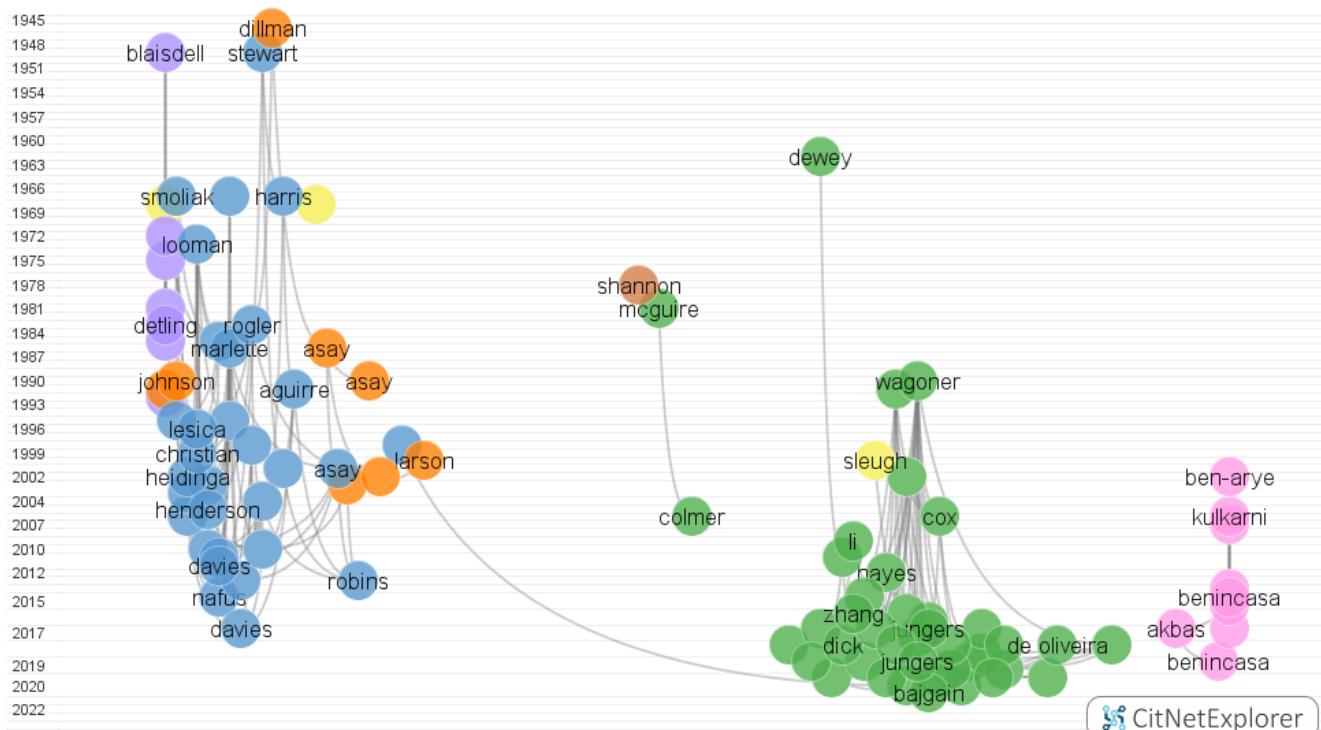
As palavras-chave com maior número de ocorrência foram “wheatgrass” (n=128), “crested wheatgrass” (n=103), “intermediate wheatgrass” (n=79), “restoration” (n=66) e wheat (n= 61). A grama de trigo, foco deste estudo, corresponde especificamente à variedade *Triticum aestivum*. No entanto, conforme apresentando na Figura 3.1a, a amostra também incluiu outras variedades de trigo como: *Tall Wheatgrass* (*Thinopyrum ponticum*), *Intermediate Wheatgrass* (*Thinopyrum intermedium*), *Crested Wheatgrass* (*Agropyron cristatum*), *Western Wheatgrass* (*Pascopyrum smithii*) e *Bluebunch Wheatgrass* (*Pseudoroegneria spicata*). Os cultivares *intermediate* e *crested*, predominantes na amostra selecionada, referem-se a gramíneas usadas principalmente para pastagem e feno (Colmer; Flowers; Munns, 2006).

Como mostrado na Figura 3.1a o software agrupou as palavras em 8 grupos, cada um representado por uma cor diferente. Cada cluster reúne termos interconectados que refletem um determinado campo de pesquisa. A maioria dos termos identificados está relacionada à práticas de agricultura, incluindo variedades de grãos de trigo, “yield” (rendimento), “perennial grains” (grãos perenes) e “forage quality” (qualidade de forrage). Por outro lado, termos como “antioxidant activity” (atividade antioxidante), “dna damage” (danos ao DNA), “wheatgrass extract” (extrato de grama de trigo), “wheatgrass juice” (suco de grama de trigo) e “phenolic compounds” (compostos fenólicos) são concentrados no grupo de coloração roxa, indicando um interesse em compreender os componentes nutricionais e funcionais da grama de trigo, que é o foco deste estudo.

A análise temporal (Figura 3.1b) utiliza uma escala de cores em gradiente, variando do azul (termos mais antigos, próximos aos anos 2000) ao amarelo (termos recentes, próximos a 2024), passando pelo verde (período intermediário, entre 2007 e 2016). Palavras relacionadas a propriedades antioxidantes, como “antioxidant activity”, “oxidative stress” e “antioxidant”, aparecem em tons amarelos, indicando um interesse recente (após 2015). Já os termos associados à agricultura predominam em tons azuis escuros, característicos de publicações mais antigas. As características nutricionais e funcionais, por sua vez, concentram-se nas tonalidades verde e amarela, refletindo sua crescente relevância a partir de 2010.

A partir da análise de palavras chaves verificou-se que a amostra era heterogênea, abrangendo artigos que vão além do foco deste estudo. Para um refinamento mais preciso, a amostra foi analisada com o *CitNetExplorer*, a fim de encontrar redes de citação direta que formassem um grupo cujo objetivo principal fosse o aproveitamento da grama de trigo como alimento. Os resultados desse refinamento são apresentados na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Análise de agrupamento realizada pelo CitNetExplore

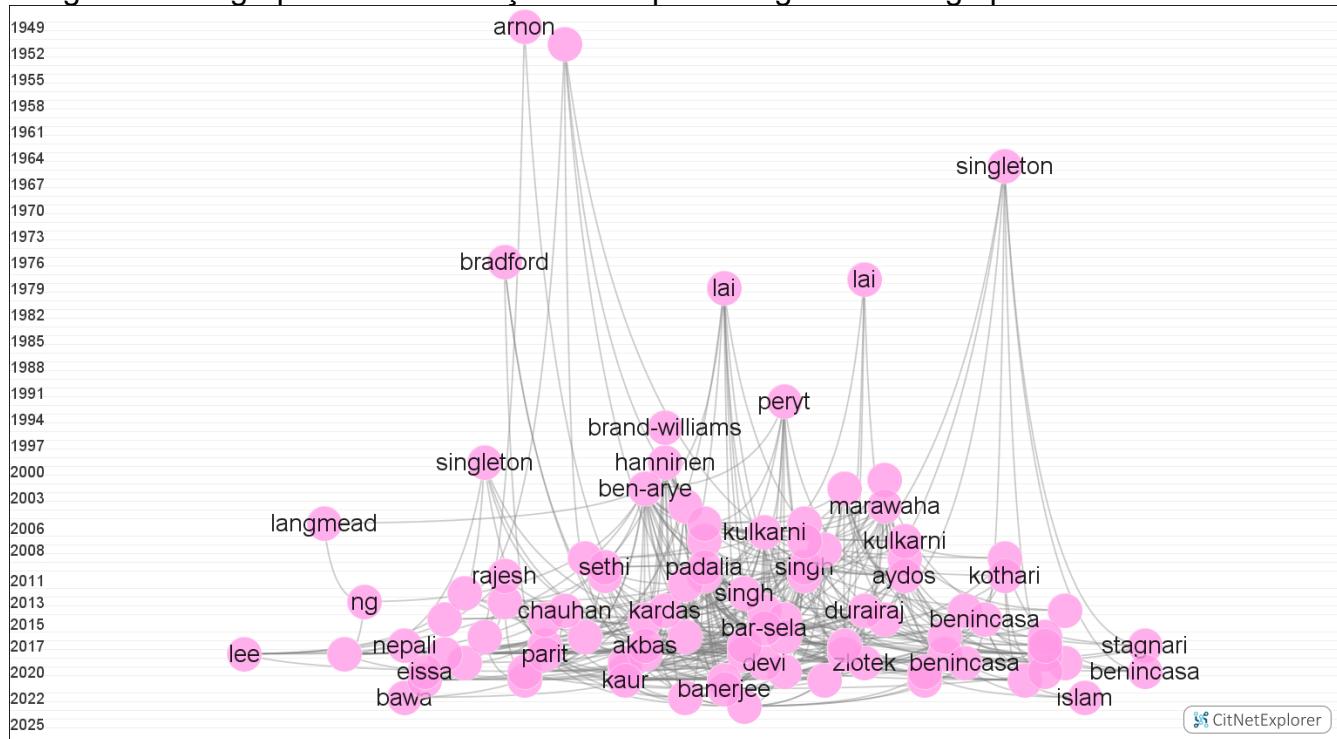


Fonte: dados da pesquisa.

O *CitNetExplorer* é um software utilizado para analisar e visualizar redes de citações de publicações científicas, realizando o agrupamento com base em relações diretas de citação. Na Figura 3.2 cada círculo representa uma publicação, e o rótulo das publicações exibe o sobrenome do primeiro autor, as linhas curvas representam as relações de citação, as conexões. A posição horizontal de uma publicação é determinada por suas relações de citação com outras publicações, enquanto a posição vertical corresponde ao seu ano de publicação (CWTS, 2014).

De acordo com a Figura 3.2 dez grupos, marcados por cores diferentes, foram encontrados, ao analisar cada grupo individualmente, foi observado que as pesquisas envolvendo a grama de trigo como suplemento alimentício é organizada no grupo rosa, composto por 254 artigos (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Agrupamento de citações a respeito de grama de trigo para consumo



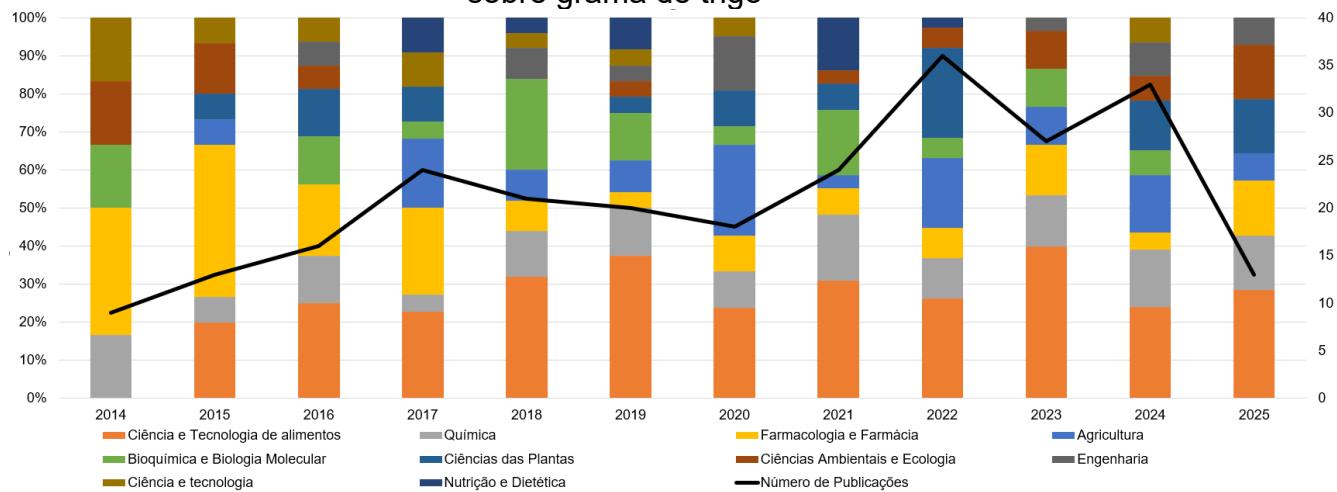
Fonte: dados da pesquisa.

Ao expandir o grupo rosa (Figura 3.3) foram identificados nomes de autores de destaque na área, como Ben-Arye, Bar-Sela e Kulkarni, e pela Figura 3.3 pode-se observar que o interesse em publicações sobre o tema começou a crescer após os anos 2014. Portanto buscando envolver um panorama mais atual e excluir artigos que a grama de trigo não fosse de interesse, a pesquisa foi refinada para os artigos que compõem o agrupamento rosa. Assim foram excluindo os artigos em que a grama de trigo utilizada como suplemento não fosse material de interesse, delimitando também o período de busca analisado aos anos de 2014 a 2025.

3.3.2 Evolução temporal das pesquisas no período de 2014 a 2024

Após delimitação da base de dados para o agrupamento rosa e realizado o refino para o período de 2014 a 2025, a nova amostra foi composta de 254 publicações, sendo 239 artigos de pesquisa e 15 artigos de revisão. A evolução das áreas de pesquisa e do número de publicações ao longo dos anos de publicação são apresentadas na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Evolução temporal das áreas de pesquisa e número de publicações sobre grama de trigo



Fonte: dados da pesquisa.

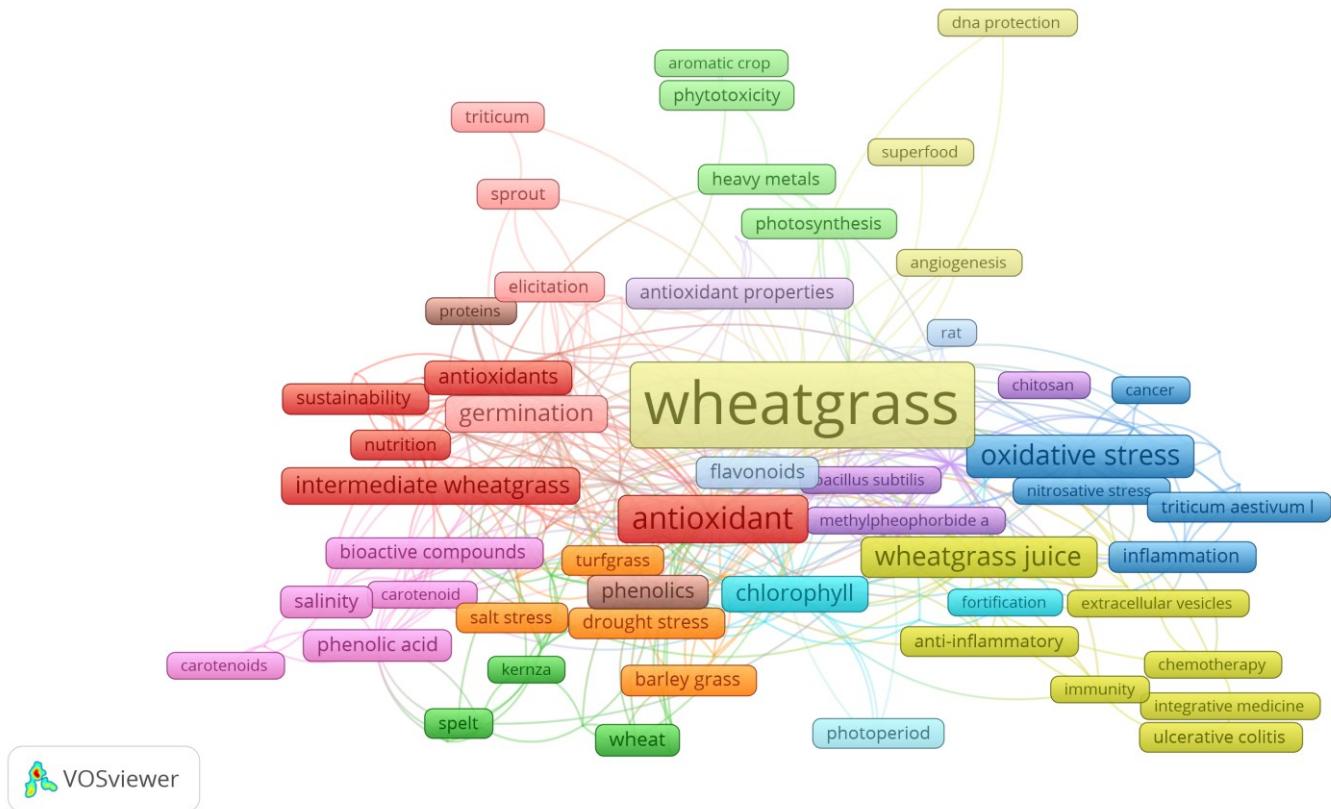
A partir da Figura 3.4 foi observado um aumento consistente no número de publicações referentes à grama de trigo a partir de 2014, com um pico em 2022, quando foram registrados 36 artigos seguido pelo ano de 2024 que contou com um total de 33 publicações.

Os artigos sobre grama de trigo estão distribuídos em 41 áreas de pesquisa, com as 10 principais representadas na Figura 3.4. Ao longo do tempo, os estudos se expandiram abrangendo um número crescente de campos. As principais categorias incluem Ciência e Tecnologia de Alimentos (80 publicações), Química (35), Farmacologia e Farmácia (34), Agricultura (33), Bioquímica e Biologia Molecular (27) e Ciência das Plantas (27), conforme ilustrado na Figura 3.4.

3.3.3 Palavras-chave

A análise de palavras-chave é um dos componentes essenciais de um estudo bibliométrico, são termos que fornecem um resumo útil de tópicos importantes em uma pesquisa e ajudam a estabelecer conexões entre os documentos (Donthu *et al.*, 2021). A partir da seleção de dados bibliométricos do período de 2014 a 2025, foram indexadas 888 palavras-chaves. Para os resultados, utilizou-se o software VOSViewer para criar o mapa de ocorrência de palavras chaves do autor. Na Figura 3.5 são apresentadas as 132 palavras com no mínimo de 2 ocorrências.

Figura 3.5 - Co-ocorrência de palavras-chave do autor para 254 publicações



Fonte: dados da pesquisa.

As palavras-chave mais frequentes foram “*wheatgrass*” (66 ocorrências e 83 ligações), “*Triticum aestivum*” (22 ocorrências e 41 ligações), “*antioxidant*” (18 ocorrências e 32 ligações), “*wheat grass*” (18 ocorrências e 13 ligações), “*antioxidante activity*” (16 ocorrências e 30 ligações), “*oxidative stresse*” (14 ocorrências e 23 ligações) e “*wheatgrass juice*” (13 ocorrências e 12 ligações). Os 50 primeiros termos de maior ocorrência são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - As 50 principais palavras-chave do autor

Palavra-chave	Nº de ocorrências	Nº de ligações	Palavra-chave	Nº de ocorrências	Nº de ligações
wheatgrass	66	83	inflammation	4	6
<i>triticum aestivum</i>	22	41	<i>tall wheatgrass</i>	4	5
wheat grass	18	13	sustainability	4	4
<i>antioxidant activity</i>	16	30	<i>amino acids</i>	3	10
<i>oxidative stress</i>	14	23	<i>elicitation</i>	3	8
wheatgrass juice	13	12	<i>nephrotoxicity</i>	3	8
<i>antioxidant</i>	12	32	<i>ricegrass</i>	3	8
<i>germination</i>	9	22	<i>anti-inflammatory</i>	3	7
<i>intermediate wheatgrass</i>	9	10	<i>salinity stress</i>	3	7
<i>chlorophyll</i>	8	19	<i>turfgrass</i>	3	7
<i>phenolic compounds</i>	7	21	<i>barley grass</i>	3	6
<i>phytochemical</i>	7	19	<i>phenolic acids</i>	3	6
<i>antioxidant enzymes</i>	6	13	<i>gene expression</i>	3	6
<i>antioxidants</i>	6	13	<i>growing conditions</i>	3	6
<i>phenolics</i>	6	13	<i>microgreens</i>	3	6
<i>apoptosis</i>	6	11	<i>polyphenols</i>	3	6
<i>flavonoids</i>	5	13	<i>sprout</i>	3	6
<i>minerals</i>	5	12	<i>total phenolic content</i>	3	6
<i>phenolic acid</i>	5	9	<i>hepatotoxicity</i>	3	5
<i>salinity</i>	5	9	<i>wheat grass powder</i>	3	5
wheat	5	5	<i>barley</i>	3	4
<i>antioxidant properties</i>	4	9	<i>fermentation</i>	3	4
<i>drought stress</i>	4	8	<i>heavy metals</i>	3	4
<i>bioactive compounds</i>	4	7	<i>photoperiod</i>	3	4
<i>antioxidant capacity</i>	4	6	<i>spelt</i>	3	4

Fonte: dados da pesquisa.

O software também identificou 15 grupos característicos. Na Tabela 3.2, são exibidos os resultados dos clusters com base na análise das palavras-chave.

Tabela 3.2 - Agrupamentos realizados pelo VOSviewer

Nº de Itens	Palavras-chave
17	<i>antioxidant, antioxidants, bread, extrusion, fatty acids, fermentation, free radicals, intermediate wheatgrass, nutrition, perennial grains, phytochemicals, phytogenics, protein, sustainability, texture, wheat grass juice, wheatgrass extract</i>
16	<i>antioxidant capacity, barley, einkorn, emmer, kenza, malt, microelements, nutritional quality, nutritional value, phenolic acids, physicochemical properties, polyphenol, ricegrass, spelt, sprouts, wheat</i>
12	<i>apoptosis, aronia melanocarpa, atopic dermatitis, cancer, hepatotoxicity, inflammation, nephrotoxicity, nitrosative stress, oxidative stress, triticum aestivum I, triticum aestivum sprout, wound healing</i>
11	<i>adjuvant chemotherapy, anti-inflammatory, chemotherapy, cytokines, extracellular vesicles, herbs, immunity, integrative medicine, safety, ulcerative colitis, wheatgrass juice</i>
9	<i>anti-cancer, bacillus subtilis, chitosan, cytotoxicity, hepatoprotective, methylpheophorbide a, thalassemia, triticum aestivum, wheat grass</i>
9	<i>alzheimer's disease, cereals, chlorophyll, cow urine distillate, fortification, microgreens, muffins, nutraceuticals, wheat grass powder</i>
9	<i>antioxidant enzymes, barley grass, biochemical compound, crested wheatgrass, drought stress, salinity stress, salt stress, tall wheatgrass, turfgrass</i>
8	<i>amino acids, antioxidant activity, carbohydrates, minerals, phenolic compounds, phenolics, proteins, total phenolic content</i>
8	<i>bioactive compounds, carotenoid, carotenoids, hydrogen peroxide, phenolic acid, salinity, seedling, sprouting</i>
8	<i>elicitation, epithelial-mesenchymal, germination, growing conditions, light, phytochemical, sprout, triticum</i>
7	<i>aromatic crop, biocide, chlorophyll fluorescence, heavy metals, photosynthesis, phytotoxicity, reproduction</i>
7	<i>diabetes, dna damage, flavonoids, gene expression, polyphenols, rat, tas</i>
6	<i>angiogenesis, dna protection, docking study, superfood, vitamin c, wheatgrass</i>
3	<i>antioxidant properties, nutritional analysis, product formulation</i>
2	<i>photoperiod, temperature</i>

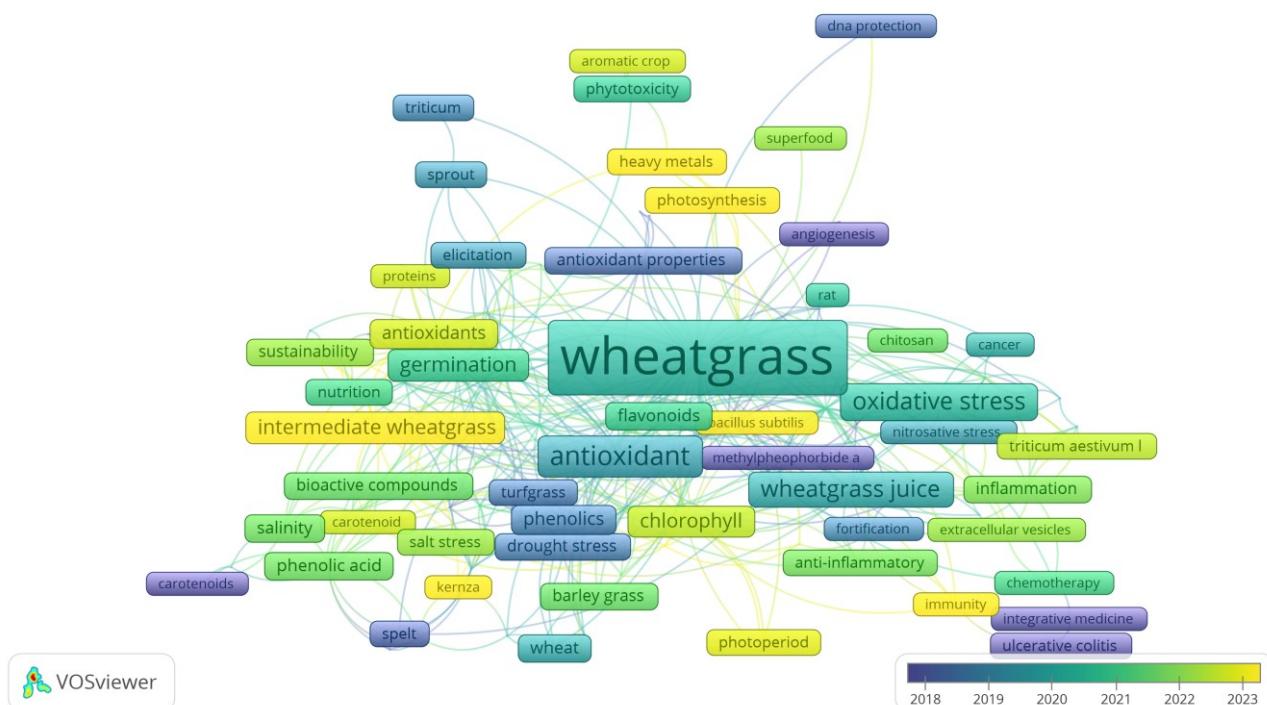
Fonte: dados da pesquisa.

Os *clusters* identificados abordam aspectos nutricionais e bioquímicos da grama de trigo. Termos como “*antioxidants*” (antioxidantes), “*nutritional quality*” (qualidade nutricional), “*wheatgrass juice*” (suco de grama de trigo), “*phenolic compounds*” (compostos fenólicos) e “*bioactive compounds*” (compostos bioativos) indicam um foco das publicações na composição química e no potencial antioxidante da grama de trigo. Termos como “*apoptosis*” (apoptose), “*hepatotoxicity*” (hepatotoxicidade), “*ulcerative colitis*” (colite ulcerativa) e “*inflammation*” (inflamação), sugerindo estudos sobre os potenciais efeitos da grama de trigo nas células, uso

potencial no combate a doenças crônicas. Ainda “*germination*” (germinação), “*photoperiod*” (fotoperíodo), “*temperature*” (temperatura) e “*growing conditions*” (condições de cultivo) são relacionados ao cultivo da grama de trigo.

A análise das palavras-chave revelou que as propriedades da grama de trigo são relevantes para seu potencial uso na alimentação e saúde, uma vez que a maioria das palavras-chave está associada à atividade antioxidante. Na Figura 3.6 é apresentado o mapa dessas palavras-chave, com uma análise baseada no tempo.

Figura 3.6 - Análise de tempo do VoSViewer



Fonte: dados da pesquisa.

Termos relacionados às propriedades antioxidantes como “*antioxidant activity*”, “*antioxidant*”, “*phenolic acid*”, entre outros, mostraram interesse crescente de pesquisa após 2018, sendo destacados em coloração verde ao amarelo. Já os termos relacionados à agricultura e melhoramento genético, discutidos anteriormente, são característicos de publicações anteriores a 2018, apresentando coloração azul mais escura.

3.3.4 Publicações mais citadas

O objetivo desta seção é destacar as publicações mais citadas na amostra do período de 2014 até 2025, consideradas as principais devido ao seu maior número de citações. As vinte publicações mais citadas sobre grama de trigo, no período de 2014 a 2025, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação dos 20 trabalhos mais citados entre o periodo de 2014 a 2024

Posição	Autores	Título da publicação	Revista	C/A*	Área de pesquisa
1	Benincasa et al., (2019)	<i>Sprouted Grains: A Comprehensive Review</i>	<i>Nutrients</i>	223/2019	Nutrição e Dietética
2	Langhorst et al., (2015)	<i>Systematic Review of Complementary and Alternative Medicine Treatments in Inflammatory Bowel Diseases</i>	<i>Journal of Crohns and Colitis</i>	141/2015	Gastroenterologia e Hepatologia
3	Şahin et al., (2019)	<i>In Vitro Wound Healing Activity of Wheat-Derived Nanovesicles</i>	<i>Applied Biochemistry and Biotechnology</i>	94/2019	Bioquímica e Biologia Molecular, Biotecnologia e Microbiologia Aplicada
4	Benincasa et al., (2015)	<i>Phenolic compounds in grains, sprouts and wheatgrass of hulled and non-hulled wheat species</i>	<i>Journal Of The Science Of Food and Agriculture</i>	91/2015	Agricultura, Química, Ciência e Tecnologia de Alimentos
5	Wan (2014)	<i>Advances in treatment of ulcerative colitis with herbs: From bench to bedside</i>	<i>World Journal Of Gastroenterology</i>	70/2014	Gastroenterologia e Hepatologia
6	Govindarajan et al., (2017)	<i>Fabrication of Hybrid Collagen Aerogels Reinforced with Wheat Grass Bioactives as Instructive Scaffolds for Collagen Turnover and Angiogenesis for Wound Healing Applications</i>	<i>Acs Applied Materials and Interfaces</i>	67/2017	Ciência e tecnologia e Ciência dos materiais
7	Sun; Li; Chen (2015)	<i>Effects of blending wheatgrass juice on enhancing phenolic compounds and antioxidant activities of traditional kombucha beverage</i>	<i>Journal Of Food and Drug Analysis</i>	62/2015	Ciência e Tecnologia de Alimentos, Farmacologia e Farmácia

8	Van Den Driessche; Plat; Mensink (2018)	<i>Effects of superfoods on risk factors of metabolic syndrome: a systematic review of human intervention trials</i>	<i>Food and Function</i>	60/2018	Bioquímica e Biologia Molecular, Ciéncia e Tecnologia de Alimentos
9	Chen et al., (2018)	<i>Food-drug interactions precipitated by fruit juices other than grapefruit juice: An update review</i>	<i>Journal Of Food and Drug Analysis</i>	55/2018	Ciéncia e Tecnologia de Alimentos, Farmacologia e Farmácia
10	Garg et al., (2021)	<i>Vitamins in Cereals: A Critical Review of Content, Health Effects, Processing Losses, Bioaccessibility, Fortification, and Biofortification Strategies for Their Improvement</i>	<i>Frontiers In Nutrition</i>	53/2021	Nutrição e Dietética
11	Kaur et al., (2021)	<i>Effect of growing conditions on proximate, mineral, amino acid, phenolic composition and antioxidant properties of wheatgrass from different wheat (<i>Triticum aestivum L.</i>) varieties</i>	<i>Food Chemistry</i>	44/2021	Química, Ciéncia e Tecnologia de Alimentos, Nutrição e Dietética
12	Akbas et al., (2017)	<i>Wheatgrass juice to wheat grass powder: Encapsulation, physical and chemical characterization</i>	<i>Journal Of Functional Foods</i>	44/2017	Ciéncia e Tecnologia de Alimentos, Nutrição e Dietética
13	Durairaj et al., (2014)	<i>Phytochemical screening and analysis of antioxidant properties of aqueous extract of wheatgrass</i>	<i>Asian Pacific Journal Of Tropical Medicine</i>	42/2014	Saúde Pública, Ambiental e Ocupacional, Medicina Tropical
14	Ghumman; Singh; Kaur, (2017)	<i>Chemical, nutritional and phenolic composition of wheatgrass and pulse shoots</i>	<i>International Journal Of Food Science and Technology</i>	40/2017	Ciéncia e tecnologia de alimento
15	Tuck et al., (2018)	<i>Fermentable short chain carbohydrate (FODMAP) content of common plant-based foods and processed foods suitable for vegetarian- and vegan-based eating patterns</i>	<i>Journal Of Human Nutrition and Dietetics</i>	39/2018	Nutrição e Dietética
16	Sharma et al., (2020)	<i>Evaluation of Anthocyanin Content, Antioxidant Potential and Antimicrobial Activity of Black, Purple and Blue Colored Wheat Flour and</i>	<i>Molecules</i>	38/2020	Bioquímica e Biologia Molecular, Química

			<i>Wheat-Grass Juice against Common Human Pathogens</i>		
17	Leong; Burritt; Oey (2016)	<i>Electropriming of wheatgrass seeds using pulsed electric fields enhances antioxidant metabolism and the bioprotective capacity of wheatgrass shoots</i>	<i>Scientific Reports</i>	38/2016	Ciência e tecnologia - Outros tópicos
18	Bar-Sela et al., (2015)	<i>The Medical Use of Wheatgrass: Review of the Gap Between Basic and Clinical Applications</i>	<i>Mini-Reviews In Medicinal Chemistry</i>	36/2015	Farmacologia e Farmácia
19	Ali et al., (2020)	<i>Effect of thermal, high hydrostatic pressure, and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation, vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice</i>	<i>Journal Of Food Process Engineering</i>	35/2020	Engenharia, Ciência e Tecnologia de Alimentos
20	Clement et al., (2016)	<i>Herbal remedies and functional foods used by cancer patients attending specialty oncology clinics in Trinidad</i>	<i>Bmc Complementary and Alternative Medicine</i>	35/2016	Medicina Integrativa e Complementar

* Relação do número de citações WoS pelo ano de publicação. Fonte: dados da pesquisa.

A publicação mais citada foi “*Sprouted grains: a comprehensive review*”, de Benincasa et al., (2019) com 223 citações. Trata-se de um artigo de revisão sobre grãos germinados, focando na influência da germinação na composição final dos brotos obtidos, em termos de macronutrientes e compostos funcionais. Os autores abordam a grama de trigo como o resultado do grão de trigo germinado, destacando sua relevância crescente nos últimos anos.

A segunda publicação mais citada foi “*Systematic Review of Complementary and Alternative Medicine Treatments in Inflammatory Bowel Diseases*” de Langhorst et al., (2015), com 149 vezes citações. O artigo realiza uma revisão sistemática dos tratamentos para doenças intestinais, com foco específico na doença de Crohn e na colite ulcerativa. No contexto do artigo, a grama de trigo é mencionada como uma fonte de compostos antioxidantes com potencial para auxiliar no tratamento dessas doenças.

O terceiro artigo mais citado foi “*In Vitro Wound Healing Activity of Wheat-Derived*” de Şahin et al., (2019). Trata-se de um artigo experimental que avalia o efeito

de extratos das folhas da grama de trigo na cicatrização de feridas cutâneas. O estudo conclui que a grama de trigo promoveu a proliferação e migração de células fibroblásticas, essenciais para o processo de cicatrização.

Os demais estudos relevantes destacados na Tabela 3.3 também abordam a grama de trigo como alimento funcional, e investigam as propriedades antioxidantas de seus extratos. Observou-se que os artigos de revisão, em geral, apresentam um número maior de citações em comparação aos artigos de pesquisa. Provavelmente isso se deve ao fato de esses trabalhos sintetizarem um grande volume de estudos, facilitando o entendimento de uma área específica do conhecimento. Como resultado, tornam-se importantes referências para pesquisadores que buscam embasamento para suas próprias pesquisas, o que contribui diretamente para o aumento do número de citações (Donthu *et al.*, 2021; Singh, 2022).

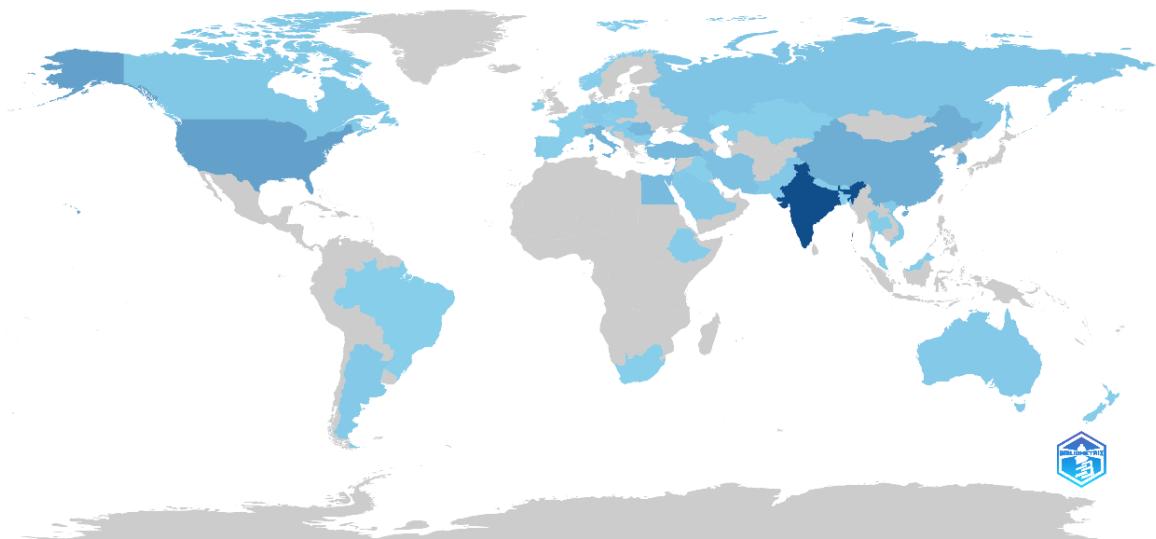
Ainda foi observado na Tabela 3.3 a maioria dos artigos é de anos anteriores a 2020. Isso se justifica pelo fato de que artigos mais recentes tendem a ter menos citações devido ao menor tempo disponível para serem referenciados em comparação aos mais antigos. Além disso, há uma tendência de que artigos mais antigos sejam mais citados, especialmente quando são considerados seminais ou fundamentais (Singh, 2022).

3.3.5 Autores e países

Na amostra foram contabilizados 1024 autores, com média de 5 coautores por documento. Com auxílio do *Bibliometrix* foram identificados os principais autores, sendo eles: Benincasa P. (coautor de 12 publicações), Falcinelli B. (9 publicações), Singh N. (7 publicações), Etemadi N. (6 publicações) e Rajagopalan R. (6 publicações). A origem das publicações mostrou-se heterogênea, com predominância de países do continente asiático. A Índia apresenta maior número de publicações (83), Estados Unidos (38 publicações), Coreia do Sul (16 Publicações), Itália (15 publicações), China (13 publicações) e Turquia (13 publicações). Muitas das produções são advindas de cooperação entre instituições que podem estar em países diferentes. Na Figura 3.7 são apresentados o mapa gerado pelo *Bibliometrix*, a intensidade da tonalidade de azul indica a quantidade de publicações assim, tons mais escuros tendem a ter maior número de publicações comparado a tons azul claro.

Figura 3.7 - Produção Científica dos Países

Country Scientific Production



Fonte: dados da pesquisa.

A concentração de estudos sobre grama de trigo por autores asiáticos justifica-se por fatores culturais e o potencial terapêutico da planta. A grama de trigo é amplamente utilizada como medicina alternativa popular em países asiáticos, devido propriedades como ação desintoxicante e anti-inflamatória. A exploração das propriedades medicinais de plantas locais exerce forte influência sobre o foco de pesquisas, assim países como Índia e China, em que o consumo da grama de trigo é comum, há um contínuo interesse em explorar cientificamente suas propriedades (Donthu *et al.*, 2021; Durairaj *et al.*, 2014b; Złotek *et al.*, 2019).

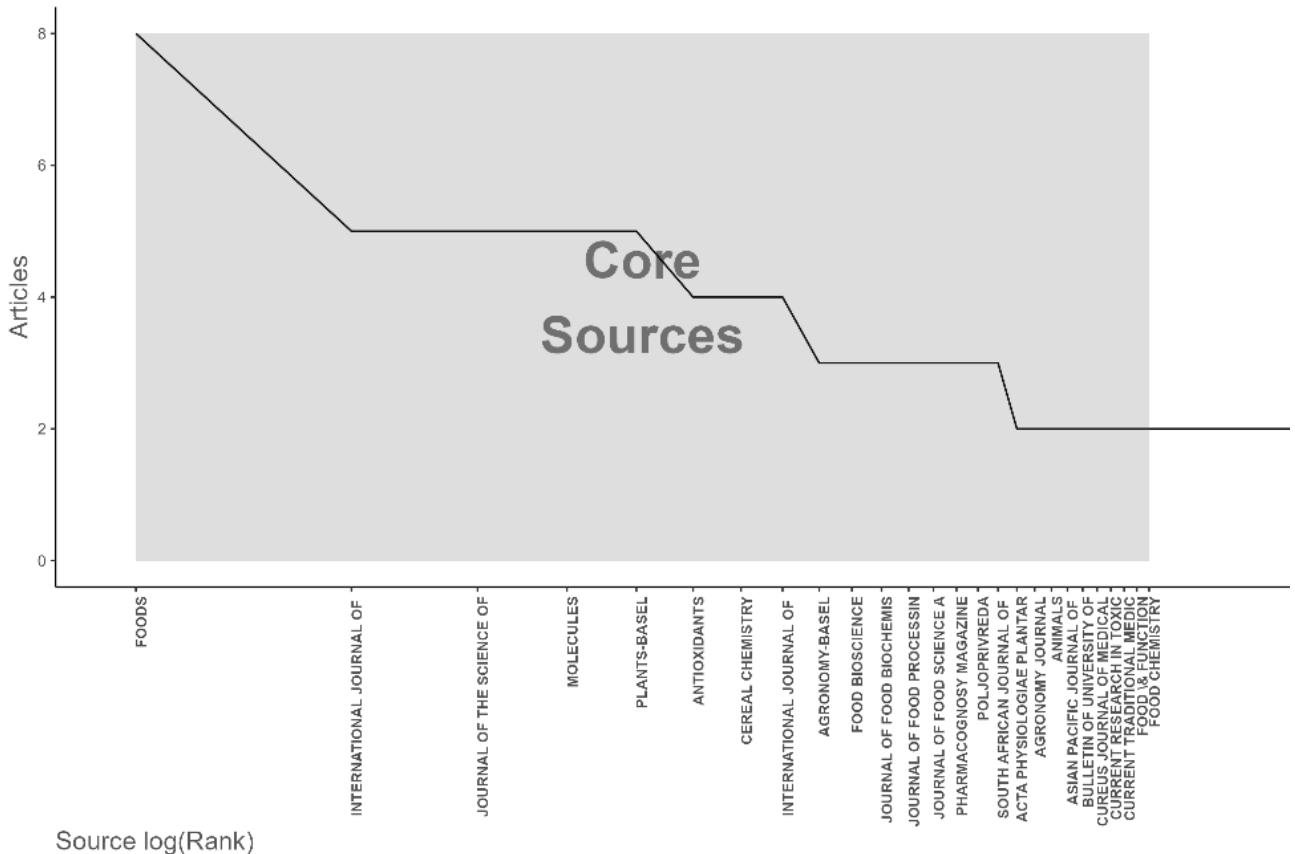
3.3.6 Periódicos

Para identificar os principais periódicos em que os artigos foram publicados, foi utilizada a Lei de Bradford, uma regra usada em bibliométrica que descreve a dispersão de artigos científicos em periódicos. Os periódicos são ordenados em ordem decrescente de produtividade (número de artigos sobre o tema) e divididos em grupos ou "zonas" de modo que cada zona contenha aproximadamente o mesmo número de artigos. No entanto, cada zona irá ter aproximado número de artigos, entretanto número diferentes de periódicos. A zona 1, que contém o núcleo de periódicos mais produtivos e relevantes; a zona 2, com periódicos menos produtivos,

mas ainda importantes; e a zona 3, que inclui muitos periódicos que publicam poucos artigos sobre o tema. Os resultados da zona 1 dessa análise são visualizados na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Principais periódicos sobre grama de trigo segundo a lei Bradford

Core Sources by Bradford's Law



Fonte: dados da pesquisa.

O *Bibliometrix*, do software R, identificou 177 periódicos na amostra de 254 artigos. A zona 1, representada pela parte cinza da Figura 3.8 é composta por 26 periódicos, que, juntos, somam 84 publicações. Essa zona representa o núcleo dos periódicos mais relevantes no tema de estudo, portanto, sendo considerados essenciais para pesquisas sobre a grama de trigo. Os periódicos com maior número de artigos publicados foram *Foods* com 8 artigos, *International Journal Of Food Science And Technology*, *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, *Plants-Basel* e *Molecules* cada um com 5 artigos em cada. A ocorrência de 84 publicações nessa zona indica que poucos periódicos concentram a maior parte dos artigos, o que

está em conformidade com a Lei de Bradford e demonstra a importância desses periódicos para a área.

A zona 2, composta por 68 periódicos e 87 publicações, apresenta uma distribuição mais dispersa. Nessa zona, um número maior de periódicos contribui com uma quantidade menor de artigos cada, assim são encontrados artigos dispersos em áreas de pesquisa diferentes. Por fim, a zona 3, com 83 periódicos e 83 publicações, evidencia uma dispersão ainda maior do tema, com muitos periódicos contribuindo com apenas um artigo cada. Esses periódicos possuem menor relevância para o campo específico de estudo e, em alguns casos, podem não ter a grama de trigo como foco central de suas publicações.

3.3.7 Identificação de estudos de processamento da grama de trigo a partir de indicadores bibliométricos

A obtenção da grama de trigo é caracterizada por um cultivo simples, que demanda poucos recursos e possui um ciclo de crescimento rápido. No entanto, o elevado teor de umidade torna a grama altamente perecível, representando um desafio para sua comercialização. Assim, estratégias de preservação da grama de trigo são essenciais para prolongar sua vida útil (Cores Rodríguez *et al.*, 2022; Minocha; Sharma; Pandey, 2021).

Com auxílio da bibliometria, foram identificados trabalhos que abordam o processamento da grama de trigo, com o foco em sua conservação. Para a identificação desses estudos, foram associadas no mapa de palavras-chave do autor as os termos como “*powder*” e “*drying*”.

Os principais resultados dessas pesquisas são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Publicações que realizaram o processamento da grama de trigo visando conservação

Referência	Método utilizados	Principais resultados
Skoczylas et al., (2018)	Congelamento por 3 meses a 40°C	O congelamento reduziu os níveis de clorofilas, carotenoides, antioxidantes e atividade da catalase, e ainda foi observado deterioração da cor.
Pardeshi; Burbade; Khod, (2013)	Secagem solar (com e sem ar forçado) e secagem à sombra (com e sem circulação forçada de ar).	O método de secagem solar com ar forçado foi considerado aceitável devido à menor temperatura de secagem (42-43°C) e menor tempo de secagem (270 min), resultando em menor teor de umidade final, maior teor de clorofila e retenção de cinzas, gorduras e proteínas.
Akbas et al., (2017)	Liofilização por 48 h	O estudo desenvolveu um pó encapsulado com proteína do soro de leite e malto dextrina, e avaliou sua digestibilidade <i>in vitro</i> . O encapsulamento preservou compostos fenólicos e atividade antioxidant, com 62% mais fenólicos no suco gástrico que no fluido intestinal, indicando proteção durante a digestão e potencial absorção no intestino.
Devi; Bains; Kaur, (2019)	Secagem a sombra sem ar forçado até peso constante, secagem em estufa a 50°C por 8 h e liofilização a -40°C por 72 h.	A liofilização foi utilizada como padrão de comparação visto que é um método com capacidade de conservação máxima de compostos sensíveis. Como conclusão, a secagem à sombra manteve melhor composição de nutrientes na grama de trigo em comparação com a secagem em estufa.
Ali et al., (2020)	Alta pressão hidrostática (500 MPa durante 60 s) e luz ultravioleta-C (254 nm, 75°C, 15 s),	O estudo avaliou a pasteurização do suco de grama de trigo utilizando alta pressão hidrostática e luz UV-C, buscando redução de 5 log UFC das bactérias testadas (<i>Escherichia coli</i> P36, <i>Listeria innocua</i> ATCC 51742 e <i>Salmonella Typhimurium</i> WG49). O tratamento com radiação resultou em alteração da cor do suco e perda da atividade enzimática. Já a alta pressão hidrostática resultou em melhor conservação das propriedades.
Chakraborty et al., (2023)	Secagem em leito fluidizado (50, 55, 60, 65, 70°C)	O estudo concluiu que a secagem a 60°C mostrou ser ideal para preservar as propriedades da grama de trigo. O conteúdo de fenólicos totais e atividade antioxidante aumentaram com as temperaturas de secagem mais altas, entretanto a reidratação diminuiu com o aumento da temperatura.

Fonte: dados da pesquisa.

Apesar de haver uma crescente atenção sobre as propriedades nutricionais da grama de trigo, os estudos sobre seu processamento e aproveitamento ainda são poucos explorados. Como mostrado na Tabela 3.4, os métodos de conservação investigados incluem congelamento, liofilização, secagem solar e secagem em estufa. Não foram encontrados estudos envolvendo metodologias emergentes, com exceção

de um estudo utilizando leito fluidizado. Buscando expandir as aplicações além do suco, alguns estudos avaliam a incorporação da grama de trigo em outros alimentos, conforme listado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Publicações que utilizaram a grama de trigo como ingrediente na formulação de alimentos

Referência	Produto de aplicação	Principais resultados
Rahman et al., (2015)	Muffin	A adição do pó de grama de trigo diminuiu o volume e endureceu a textura dos <i>muffins</i> devido à maior presença de fibras, ainda apresentaram propriedades antioxidantes, atribuídas aos compostos fenólicos devido a adição do pó de grama de trigo. <i>Muffins</i> com adição de 5% de pó obtiveram maior aceitabilidade sensorial do que comparado com 7,5.%
Sun; Li; Chen, (2015)	Kombucha	O kombucha modificado com uma proporção de 1:1 de suco de grama de trigo para chá preto mostrou maior atividade antioxidante após 3 dias de fermentação comparado ao controle produzido sem suco.
Grubišić et al., (2022)	Suco	A pesquisa avaliou o impacto da mistura de suco de grama de trigo na qualidade nutricional dos sucos de maçã, beterraba, cenoura, laranja e limão. Após a adição de suco de grama de trigo foi observado aumento no conteúdo total de fenólicos e flavonoides totais, atividade antioxidante e de microelementos (Ca, Mg, Mn e Zn).
Bawa et al., (2022b)	Macarrão	O estudo avaliou o impacto da substituição de água por suco de grama de trigo nas proporções de 33, 66 e 100% em massa de macarrão. A substituição de 100% de água por suco na massa reduziu o tempo de cozimento. Em análise sensorial obteve pontuação de 7,2 em atributos gerais.
Mishra; Tripathi; Dwivedi, (2020)	Cupcake	A adição de grama de trigo aos <i>cupcakes</i> aumentou a atividade antioxidante, teor de minerais (ferro, cálcio) e fibra dietética.
Kaur et al., (2023)	Suco fermentado de grama de trigo usando	O suco de grama de trigo fermentado usando os microrganismos <i>Saccharomyces cerevisiae</i> e <i>Pediococcus acidilactici</i> por 24 h, apresentou coloração marrom-avermelhada devido à produção de pigmentos vermelhos. Foi observado aumento de antocianinas, fenóis totais e betacarotenos em comparação ao suco não fermentado.
Halim et al., (2024)	Bolo e biscoito assado	Os autores descobriram que a substituição parcial da farinha de trigo por pó de grama de trigo aumentou os compostos fenólicos, a atividade antioxidante e o conteúdo de β-caroteno nos produtos assados. Produtos com 3-6% de substituição apresentaram melhor aceitação sensorial.
Cetiner et al., (2023)	Pão	Pães com 15% de adição de pó de grama de trigo em alternativa a farinha tradicional apresentaram maior volume e menor dureza, indicando ser um produto macio. Todos os pães enriquecidos apresentaram maiores níveis de pigmento amarelo, fenólicos totais e atividade antioxidante.

Fonte: dados da pesquisa.

Os estudos apresentados na Tabela 3.5 destacam a possibilidade de aplicação da grama de trigo em diversas aplicações em formulações alimentícias, com impactos nas propriedades nutricionais, sensoriais e funcionais dos produtos. De maneira geral, a adição da grama de trigo aumentou os níveis de compostos bioativos. Também são encontrados estudos de aplicação da grama de em isolados de proteína (Huft *et al.*, 2023) e suplemento para alimentação animal (Barbacariu *et al.*, 2021). Essas pesquisas mostram o potencial da grama de trigo e indicam caminhos para novas descobertas, ampliando as possibilidades de uso em diferentes tipos de alimentos.

3.4 CONCLUSÃO

Com base na análise bibliométrica relacionada à grama de trigo nos últimos 10 anos, é possível concluir que essa planta tem recebido significativa atenção devido às suas propriedades bioativas, que agregam benefícios nutricionais e terapêuticos à saúde.

A base de dados *Web of Science* foi utilizada para análise e coleta de dados, identificando 2.950 documentos publicados entre 1957 e 2024. O termo "grama de trigo" abrange toda a parte aérea da planta, não se restringindo apenas ao consumo humano, o que resultou em uma amostra heterogênea e exigiu refinamento das pesquisas. Após esse processo, verificou-se que o uso da grama de trigo como alimento funcional começou a ser explorado em 2002. A partir de 2014, houve um aumento crescente nas publicações sobre o tema, destacando o interesse nas propriedades antioxidantes da planta.

A análise revelou que a grama de trigo é valorizada principalmente por seu alto teor de compostos com propriedades antioxidantes, clorofila e vitaminas, termos identificados com maior frequência na análise de palavras-chave do autor. As principais áreas de estudo que concentram as publicações são Tecnologia de Alimentos, Agricultura, Química, Bioquímica Molecular e Ciência das plantas. Aplicando a lei de Bradford, verificou-se que 23 periódicos concentram a maior parte das publicações. Além disso, o autor mais influente identificado foi Benincasa, P, com 14 publicações e um longo histórico de produção sobre o tema.

Os estudos de aplicação encontrados mostram iniciativas de uso da grama de trigo em diferentes matrizes alimentares, como bebidas funcionais e produtos de panificação. Os resultados indicam que a adição da grama de trigo contribui para o aumento dos teores de compostos bioativos, ampliando seu potencial funcional e nutricional.

CAPÍTULO 4 SECAGEM DA GRAMA DE TRIGO UTILIZANDO O MÉTODO DE SPRAY DRYING

4.1 INTRODUÇÃO

A grama de trigo consiste nas folhas jovens do trigo comum (*Triticum aestivum* L.), colhidas geralmente até duas semanas depois da germinação e consumida, principalmente, na forma de suco fresco. O suco da grama de trigo ganhou reconhecimento como alimento funcional por conter propriedades benéficas à saúde, como efeitos desintoxicantes e anti-inflamatórios, atribuídos à presença de compostos com ação antioxidante, incluindo vitaminas e compostos bioativos, como ácidos fenólicos, flavonoides, carotenoides e clorofila (Bar-Sela *et al.*, 2015; Kaur *et al.*, 2022; Minocha; Sharma; Pandey, 2021; Mishra *et al.*, 2025; Tamraz; Al Ghossaini; Temraz, 2024; Tullo; Abera, 2023).

Seu cultivo é simples, requer poucos recursos e possui um ciclo de crescimento rápido, o que contribuiu para sua popularidade como um alimento saudável. No entanto, as folhas da grama de trigo apresentam alta perecibilidade devido ao seu elevado teor de umidade (Cores Rodríguez *et al.*, 2022; Kaur *et al.*, 2022; Mishra *et al.*, 2025; Onyango Ogutu *et al.*, 2017). Quando armazenadas sob refrigeração, mantêm-se viáveis por até duas semanas, embora com perda significativa de suas propriedades funcionais. Já o suco pode ser congelado, preservando-se por até três meses (Skoczyłas *et al.*, 2018).

Em larga escala, a aplicação da cadeia do frio no processamento e distribuição da grama de trigo mostra-se inviável devido aos custos associados, incluindo consumo de energia, infraestrutura e logística (Friedman-Heiman; Miller, 2024). Assim, torna-se necessário explorar métodos de conservação que preservem suas propriedades nutricionais e prolonguem sua vida útil, ampliando sua disponibilidade. Nesse contexto, o processo de secagem apresenta-se como uma alternativa promissora para o processamento da grama de trigo.

Diversos estudos já avaliaram a obtenção de grama de trigo desidratada por diferentes métodos de secagem, como secagem solar, à sombra, em estufa convectiva, em leito fluidizado e liofilização (Akbas *et al.*, 2017; Chakraborty *et al.*,

2023; Devi; Bains; Kaur, 2019a, 2019b; Pardeshi; Burbade; Khod, 2013; Sharma; Thakur; Dhaliwal, 2019). De modo geral, a qualidade do produto seco variou conforme o método utilizado, apresentando resultados promissores. Além disso, a grama de trigo em pó demonstrou potencial para uso como ingrediente na formulação de alimentos, especialmente em produtos de panificação e massas (Bawa *et al.*, 2022b, 2022a; Halim *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2015).

Alimentos em pó obtidos por secagem devem atender a requisitos nutricionais, sensoriais, funcionais e microbiológicos, com estabilidade durante armazenamento e capacidade de reidratação (Dantas *et al.*, 2023). Diferentes métodos podem ser empregados para a produção de pós com alta qualidade tecnológica e características gerais desejadas, como a secagem por atomização (Pui; Saleena, 2022).

A secagem por atomização (*spray drying - SD*), consiste na pulverização de um líquido (suspensão) em finas gotículas, que são rapidamente secas por uma corrente de ar quente. A secagem por atomização por ser um método rápido de secagem, tem potencial de preservar nutrientes, cor e compostos sensíveis, sendo amplamente utilizada na produção pós e partículas de frutas e vegetais (Dantas *et al.*, 2023; Srivastava *et al.*, 2022).

Embora existam estudos sobre a secagem da grama de trigo, não foram encontradas pesquisas específicas sobre o uso da secagem por atomização. Portanto, surge uma oportunidade para investigar a obtenção do pó a partir do suco da grama de trigo por meio da secagem por atomização. O presente trabalho tem como objetivo explorar a viabilidade da secagem por atomização para produção de pó de grama de trigo, avaliando a influência das condições de processo nas propriedades físico-químicas, preservação de compostos bioativos, e capacidade de reidratação do produto.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de secagem e caracterização (da grama de trigo *in natura* e seca) foram realizados nas dependências dos laboratórios da Universidade Federal de Uberlândia, *campus Patos de Minas*.

4.2.1 Obtenção da grama de trigo

O cultivo da grama de trigo foi realizado utilizando sementes de trigo orgânico obtida comercialmente, como mostrado na Figura 4.1 (Ecobio, Brasil). Foram adquiridos 35 pacotes de um mesmo lote (totalizando 14 kg) para cultivo ao longo do estudo.

Figura 4.1 – Sementes comerciais de trigo utilizadas para cultivo



Fonte: arquivo pessoal.

O cultivo foi adaptado com base nos trabalhos de Patil et al., (2022), Clyde-Smith e Campos, (2023), Xu et al., (2022) e Kulkarni et al., (2006). Em resumo, a obtenção da grama de trigo ocorre em duas etapas: germinação dos grãos e crescimento da planta. A germinação foi induzida deixando-se os grãos de molho em água por 10 h, seguida de um período de 24 h no escuro, durante o qual os grãos foram hidratados a cada 8 h, conforme ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Esquematização do processo de germinação dos grãos de trigo



Fonte: arquivo pessoal.

Após a germinação, os grãos foram espalhados em recipiente adequados para o crescimento da planta e expostos a luz, sendo regados a cada 12 h. Para o presente trabalho, o crescimento foi realizado em vasilhames de dimensões 30 cm x 23 cm x 3,5 cm, apresentado na Figura 4.3a. O cultivo da grama de trigo pode ser realizado com ou sem solo, utilizando o sistema hidropônico. Neste estudo, optou-se pelo uso de substrato de jardinagem (Bioplant Vasos e Floreiras, Brasil), conforme apresentado na Figura 4.3b.

Figura 4.3 – Materiais utilizados no cultivo da grama de trigo, em que: a) Recipiente utilizado para crescimento da grama de trigo, b) Substrato utilizando para cultivo

a)



Fonte: Nagura Ferragista

b)



Fonte: Bioplant

A composição do substrato inclui fertilizantes multinutrientes (nitrogênio, potássio e fosforo), turfa de Sphagnum, fibra de coco, casca de arroz, turfa preta, bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro de cana-de-açúcar (Bioplant, 2025).

O recipiente de dupla camada utilizado permitiu a respiração das raízes e a drenagem do excesso de água. Testes preliminares realizados em recipientes fechados resultaram em rápida deterioração das raízes e no crescimento de mofo. O substrato foi escolhido por proporcionar sustentação ao crescimento das sementes e retenção de umidade. O cultivo sem substrato até é possível, entretanto demanda maior volume de água para evitar ressecamento das raízes, além da necessidade de trocas frequentes para prevenir a proliferação de microrganismo.

Para o presente estudo, o tempo de crescimento foi definido com base no estudo de Kulkarni et al., (2006), no qual as folhas foram padronizadas com 12 dias de crescimento, atingindo aproximadamente 15 cm de altura. No entanto, a partir de testes preliminares, observou-se que a grama de trigo mantinha-se verde até o 9º dia de cultivo (Figura 4.4c). Após esse período, as folhas começaram a murchar e apresentar coloração amarelada. Após o cultivo da grama de trigo, o corte foi realizado aproximadamente 2 cm acima das raízes.

Figura 4.4 - Crescimento da grama de trigo: a) 1 dia, b) 5 dias, c) 9 dias e d) 12 dias
a)
b)



c)



d)



Fonte: arquivo pessoal

De acordo com os estudos de Kulkarni et al., (2006), a época de cultivo influencia no desenvolvimento da grama de trigo. Fatores climáticos, como umidade

relativa do ar, tempo de exposição e intensidade da luz solar, afetam o crescimento do cultivo. Buscando padronização dos experimentos, a grama de trigo utilizada neste estudo foi cultivada entre os meses de agosto a outubro, com objetivo de acumular matéria-prima para realizar os experimentos de secagem.

Após o cultivo, as folhas foram acondicionadas em embalagens de polietileno transparente, cada uma contendo aproximadamente 200 g. Então, as embalagens foram submetidas à aplicação de vácuo (Figura 4.5) e armazenadas em *ultrafreezer* (Indrel, modelo IULT335D, Brasil) a -60°C. Para as folhas destinadas aos estudos com tratamento térmico, foi realizado o branqueamento logo após a colheita, ainda com o material fresco. A aplicação de vácuo teve como objetivo remover o ar do interior das embalagens, reduzindo o volume e otimizando o espaço de armazenamento no *ultrafreezer* (Figura 4.5).

Figura 4.5 - Grama de trigo embalada para posterior armazenamento em congelador



Fonte: arquivo pessoal.

4.2.1.1 Branqueamento da grama de trigo

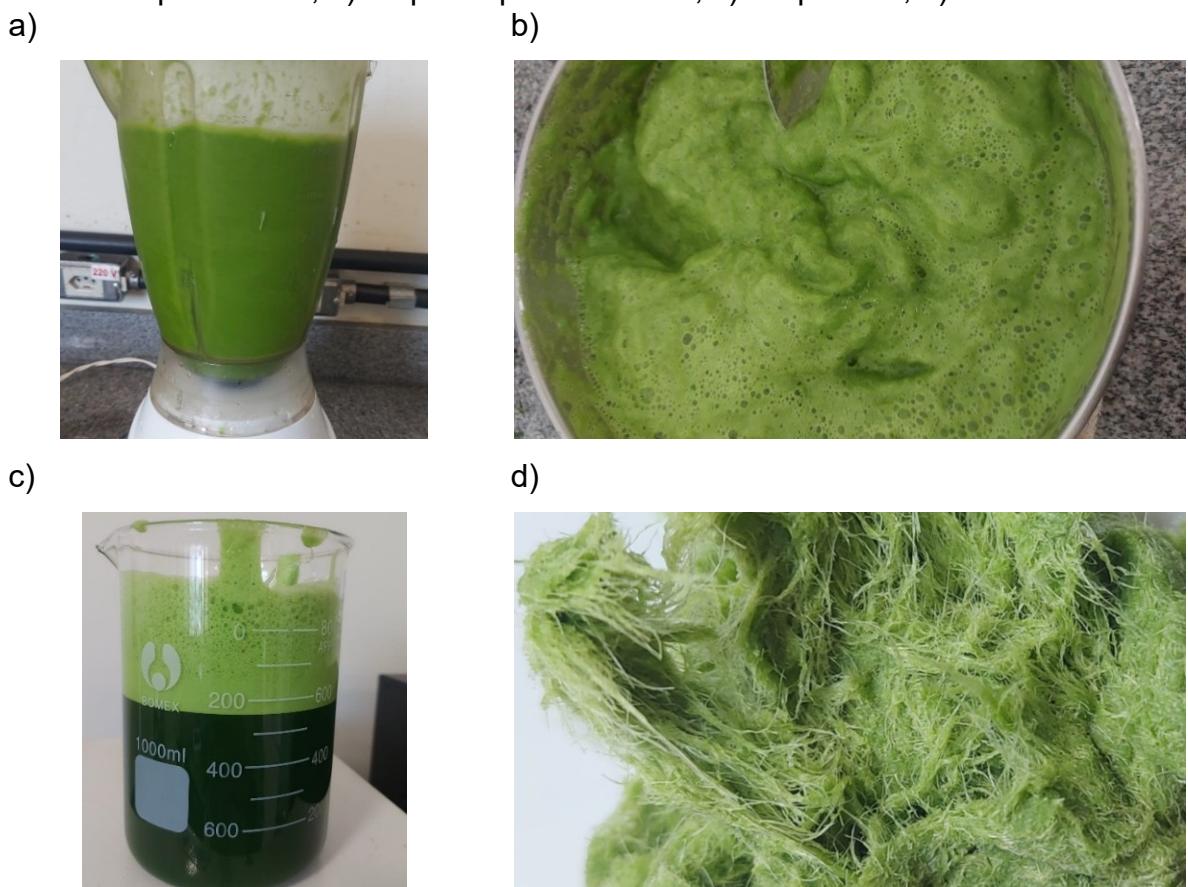
Nas amostras submetidas ao tratamento térmico por branqueamento, as folhas de grama de trigo foram submersas em água a 98°C, por 30 s. Em seguida, as folhas foram retiradas com auxílio de uma peneira e imediatamente imersas em água fria com gelo até total resfriamento, aproximadamente 5 minutos. Após o resfriamento, o excesso de água superficial foi removido deixando-se as folhas em repouso sobre uma peneira até cessar o gotejamento. As amostras foram então acondicionadas em

embalagens de polietileno transparente, contendo aproximadamente 200 g em cada, e estocadas em ultrafreezer (Indrel, modelo IULT335D, Brasil) a -60°C.

4.2.2 Preparo das amostras para secagem

Previamente à realização dos experimentos de secagem por atomização, as amostras das folhas de grama de trigo, com e sem branqueamento, ainda congeladas, foram trituradas em liquidificador (Philips Walita modelo 600 W, Brasil), adicionando-se água destilada na proporção de 1:3. Em seguida, a suspensão foi peneirada, em uma peneira de 12 mesh Tyler (1,41 mm) para a remoção de partículas maiores, uma vez que estas poderiam causar entupimento do bico atomizador, processo esquematizado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Etapas de obtenção da suspensão de grama de trigo, em que: a) no liquidificador, b) etapa de peneiramento, c) suspensão, d) resíduo

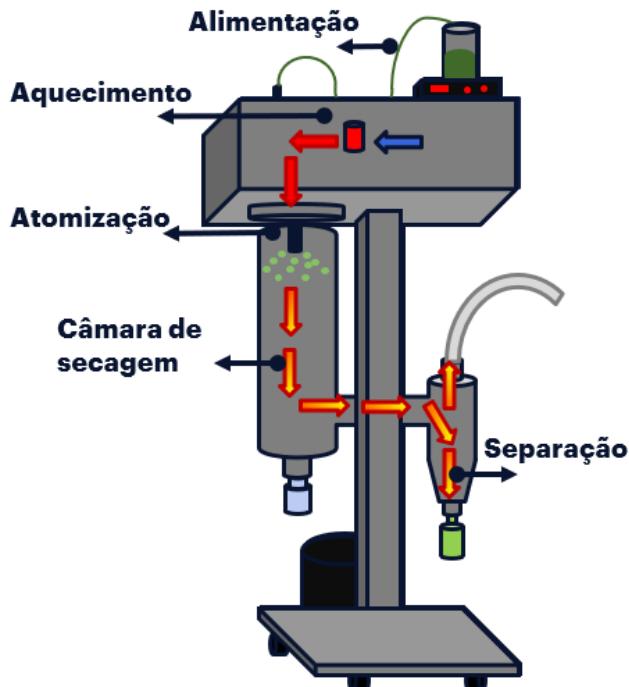


Fonte: Arquivo pessoal

4.2.3 Secagem utilizando Spray Dryer

A secagem por atomização foi realizada utilizando equipamento *spray dryer* (LabMaq, modelo LM MSD 1.0, Brasil) com capacidade de $1 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$. Na Figura 4.7 está esquematizado a unidade experimental utilizada para a realização da secagem.

Figura 4.7 – Esquematização do *Spray dryer* utilizado para a secagem da grama de trigo



Fonte: arquivo pessoal.

A atomização do equipamento é realizada por meio de um bico pneumático de 3 mm de abertura, o dispositivo utiliza ar comprimido isento de óleo. Para os experimentos a taxa de alimentação de ar comprimido para atomização foram fixados em $3,5 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$. Também, para evitar a sedimentação das partículas, a suspensão, foi mantida sob agitação magnética (IKA, modelo C-MAG HS 7, Brasil).

4.2.4 Planejamento experimental e análise estatística

Para realizar uma comparação inicial entre as amostras *in natura*, com e sem branqueamento, avaliou-se a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk, com o objetivo de verificar a aderência à distribuição normal. Quando os dados apresentaram distribuição normal (ambas as amostras com $p > 0,05$), foi aplicado o

teste *t* de Student. Nos casos em que a normalidade não foi confirmada, utilizou-se o teste de Wilcoxon, que é um teste não paramétrico.

No que se refere aos experimentos de secagem e à análise estatística dos respectivos resultados, empregou-se a metodologia de planejamento fatorial de experimentos descrita por Box; Hunter e Hunter, (1978), com o intuito de investigar o efeito das principais variáveis de processo sobre as características do pó de grama de trigo obtido. Essa abordagem permite a economia de recursos e tempo, possibilitando a avaliação simultânea de múltiplos fatores na busca por condições ideais de operação.

Inicialmente, foi conduzido um planejamento fatorial a dois níveis completo (2^k), com 4 variáveis - ou seja, um delineamento 2^4 -, totalizando 16 ensaios. As faixas experimentais das variáveis independentes investigadas foram definidas com base na condução de testes preliminares, na revisão da literatura especializada e nos limites operacionais do *spray dryer*.

Na Tabela 4.1, são apresentados os fatores e os níveis (reais e codificados) avaliados no planejamento 2^4 , em que X_1 , X_2 , X_3 e X_4 representam (na forma codificada), respectivamente: tratamento térmico, temperatura do ar de secagem, vazão de alimentação e vazão do ar secagem. Já na Tabela 4.2, encontra-se a matriz experimental correspondente, com os níveis reais e codificados.

Tabela 4.1 - Fatores e níveis investigados no planejamento 2^4 .

Fatores	Nível	
	-1	+1
Tratamento térmico (X_1)	SB	CB
Temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$) (X_2)	110	150
Vazão de ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) (X_3)	1,10	1,50
Vazão de alimentação ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$) (X_4)	0,40	0,80

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 4.2 - Matriz do planejamento 2⁴.

Experimento	Tratamento térmico (X ₁)	Temperatura (°C) (X ₂)	Vazão de alimentação (L·h ⁻¹) (X ₃)	Vazão do ar de secagem (m ³ ·m ⁻¹) (X ₄)
1	SB (-1)	110 (-1)	0,4 (-1)	1,1 (-1)
2	SB (-1)	110 (-1)	0,4 (-1)	1,5 (+1)
3	SB (-1)	110 (-1)	0,8 (+1)	1,1 (-1)
4	SB (-1)	110 (-1)	0,8 (+1)	1,5 (+1)
5	SB (-1)	150 (+1)	0,4 (-1)	1,1 (-1)
6	SB (-1)	150 (+1)	0,4 (-1)	1,5 (+1)
7	SB (-1)	150 (+1)	0,8 (+1)	1,1 (-1)
8	SB (-1)	150 (+1)	0,8 (+1)	1,5 (+1)
9	CB (+1)	110 (-1)	0,4 (-1)	1,1 (-1)
10	CB (+1)	110 (-1)	0,4 (-1)	1,5 (+1)
11	CB (+1)	110 (-1)	0,8 (+1)	1,1 (-1)
12	CB (+1)	110 (-1)	0,8 (+1)	1,5 (+1)
13	CB (+1)	150 (+1)	0,4 (-1)	1,1 (-1)
14	CB (+1)	150 (+1)	0,4 (-1)	1,5 (+1)
15	CB (+1)	150 (+1)	0,8 (+1)	1,1 (-1)
16	CB (+1)	150 (+1)	0,8 (+1)	1,5 (+1)

Dados representação na forma: variável real (variável codificada). Fonte: dados da pesquisa.

O planejamento 2^k pode indicar tendências e direções para a pesquisa, auxiliando na seleção das variáveis mais significativas e fornecendo indícios da intensidade e do sentido do efeito dessas variáveis sobre as respostas. Além disso, contribui para a exclusão de variáveis com efeito estatisticamente não significativo ou de menor relevância. Esse tipo de delineamento permite investigar efeitos lineares e de interação entre os fatores. No entanto, por envolver apenas dois níveis por fator, não é adequado para captar curvaturas ou comportamentos não lineares no sistema avaliado. Ainda assim, pode ser utilizado como etapa inicial para planejamentos com mais níveis, como os compostos centrais (Yolmeh; Jafari, 2017), que possibilitam o ajuste de modelos empíricos não lineares para representar o fenômeno estudado e facilitar a visualização dos efeitos das variáveis independentes por meio de superfícies de resposta.

Nesse sentido, a partir da análise dos resultados do planejamento fatorial 2⁴, e considerando que, de forma geral, todas as variáveis apresentaram efeitos

significativos, fixou-se o nível da variável qualitativa (tratamento térmico) e realizou-se a expansão do planejamento fatorial 2^k , com três variáveis independentes (ou seja, um delineamento 2^3), para um planejamento composto central rotacional (PCCR). Esse delineamento avaliou, em cinco níveis, os efeitos da temperatura do ar de secagem, da vazão do ar de secagem e da vazão de alimentação da suspensão, permitindo o ajuste de modelos quadráticos e a construção de superfícies de resposta no processo de *spray drying*.

A metodologia de superfície de resposta (MSR) permite o ajuste de modelos polinomiais de segunda ordem, capazes de descrever adequadamente a relação entre as variáveis independentes e as respostas do processo. O planejamento composto central (PCC) é frequentemente utilizado nesse contexto, pois combina ensaios fatoriais, axiais e centrais, permitindo a estimativa da variabilidade experimental e a obtenção de modelos quadráticos (Yolmeh; Jafari, 2017).

O PCCR foi estruturado com 8 experimentos do planejamento 2^3 (resultantes da fixação do tratamento térmico), 6 pontos axiais e 2 repetições no ponto central, totalizando 16 ensaios. Os dados foram analisados com os softwares STATISTICA® (versão 7.1, StatSoft, EUA).

As variáveis independentes avaliadas foram: temperatura do ar de secagem (X_2), vazão de alimentação da solução no secador (X_3) e vazão do ar de secagem (X_4). A Tabela 4.3 apresenta os níveis utilizados para cada variável, sendo que o valor do nível axial ($\pm\alpha$) foi definido como $\pm 1,68$. As variáveis foram adimensionalizadas conforme apresentado nas Equações 4.1 a 4.3, em que T representa a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), F a vazão de alimentação ($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$) e V a vazão do ar de secagem ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$), correspondendo, respectivamente, às variáveis codificadas X_2 , X_3 e X_4 .

Tabela 4.3 - Fatores e níveis investigados no planejamento PCCR.

Fatores	Nível				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$) (X_2)	96,36	110	130	150	163,64
Vazão de alimentação ($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$) (X_3)	0,26	0,4	0,6	0,8	0,94
Vazão de ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$) (X_4)	0,96	1,1	1,3	1,5	1,64

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 4.4 - Matriz do planejamento PCCR.

Experimento	Temperatura (°C) (X_2)	Vazão de alimentação (L·h ⁻¹) (X_3)	Vazão do ar de secagem (m ³ ·m ⁻¹) (X_4)
1	110,00 (-1,00)	0,40 (-1,00)	1,10 (-1,00)
2	110,00 (-1,00)	0,40 (-1,00)	1,50 (1,00)
3	110,00 (-1,00)	0,80 (1,00)	1,10 (-1,00)
4	110,00 (-1,00)	0,80 (1,00)	1,50 (1,00)
5	150,00 (1,00)	0,40 (-1,00)	1,10 (-1,00)
6	150,00 (1,00)	0,40 (-1,00)	1,50 (1,00)
7	150,00 (1,00)	0,80 (1,00)	1,10 (-1,00)
8	150,00 (1,00)	0,80 (1,00)	1,50 (1,00)
9	96,36 (-1,68)	0,60 (0,00)	1,30 (0,00)
10	163,64 (1,68)	0,60 (0,00)	1,30 (0,00)
11	130,00 (0,00)	0,26 (-1,68)	1,30 (0,00)
12	130,00 (0,00)	0,94 (1,68)	1,30 (0,00)
13	130,00 (0,00)	0,60 (0,00)	0,96 (-1,68)
14	130,00 (0,00)	0,60 (0,00)	1,64 (1,68)
15	130,00 (0,00)	0,60 (0,00)	1,30 (0,00)
16	130,00 (0,00)	0,60 (0,00)	1,30 (0,00)

Dados representação na forma: variável real (variável codificada). Fonte: dados da pesquisa.

$$X_2 = \frac{T [^{\circ}C] - 130}{20} \quad (4.1)$$

$$X_3 = \frac{F [L \cdot h^{-1}] - 0,6}{0,2} \quad (4.2)$$

$$X_4 = \frac{V [m^3 \cdot min^{-1}] - 1,3}{0,2} \quad (4.3)$$

A partir dos dados experimentais obtidos com o PCCR, foram ajustados modelos empíricos (Equação 4.4) por regressão múltipla, segundo a metodologia proposta por Box et al. (2005). As equações resultantes descrevem a resposta estimada (\hat{y}) em função das variáveis independentes, conforme a metodologia de superfície de resposta (Myers, 1976).

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad i < j \quad (4.4)$$

Os resultados experimentais da caracterização da grama de trigo seca foram analisados estatisticamente por meio de regressão múltipla. A estimativa dos efeitos

dos fatores (no planejamento 2^k) e dos coeficientes dos modelos empíricos (no PCCR) foi realizada pelo método dos mínimos quadrados. A significância estatística desses efeitos ou coeficientes foi avaliada por meio de testes de hipótese (ANOVA), adotando-se nível de significância de 10% no teste F (valores de $p < 0,10$ foram considerados significativos). As variáveis resposta avaliadas foram: rendimento, umidade final do produto, cor (L^* , a^* , b^* , C^* e h°), higroscopicidade, solubilidade e compostos bioativos (fenólicos totais, flavonoides totais, carotenoides totais e clorofila total). A qualidade dos modelos ajustados no PCCR foi verificada por meio do coeficiente de determinação (R^2), do teste F (nível de significância de 1%) e da análise dos resíduos.

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

4.2.5.1 Determinação da umidade

A umidade das amostras foi determinada por gravimetria, seguindo a metodologia AOAC. (2005). A umidade das amostras, em base úmida, foi calculada de acordo com a Equação 4.5.

$$X_{Bu} = \frac{M - M_s}{M} \quad (4.5)$$

Em que X_{bu} é a umidade do produto em base úmida (g água.g sólido umido⁻¹), M é a massa do sólido úmido (g) e M_s é a massa do sólido seco (g). As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.5.2 Atividade de água

A determinação da atividade de água (a_w) das amostras foi realizada por leitura direta utilizando analisador de atividade digital (ADDIUM, modelo Aqualab PRE CAP, USA). As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.5.3 Rendimento

O rendimento da secagem foi calculado como a razão entre a massa de sólidos no produto em pó coletado e a massa de sólidos da alimentação do secador (suspensão da grama de trigo), de acordo com a Equação 4.6.

$$R = \frac{M_{s,pó}}{M_{s,suco}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Em que, R é o rendimento da secagem (%), $M_{s,pó}$ é a massa (g) de sólidos do pó coletada após a secagem em *spray dryer* e $M_{s,suco}$ é a massa (g) de sólidos na suspensão alimentada no *spray dryer* (Braga et al., 2020).

4.2.5.4 Higroscopicidade

A higroscopicidade do pó obtido foi determinada de acordo com a metodologia adaptada de Cai e Corke (2000). Aproximadamente 1 g de cada amostra foi acondicionada em cadiinhos de alumínio em seguida mantidos em dessecador contendo uma solução saturada de NaCl (umidade relativa de 75,3%) a 25°C, e após uma semana, as amostras foram pesadas. A higroscopicidade foi obtida a partir das Equações 4.7 e 4.8.

$$H = \frac{M_{ads}}{M_{ss}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

$$M_{ss} = M_s - (M_s * X_{bu}) \quad (4.8)$$

Em H representa a higroscopicidade (g de umidade adsorvida. 100^{-1} de massa seca); M_{ads} é a massa de umidade adsorvida (g) e M_{ss} é a massa de sólidos secos (g), M_s é a massa de sólido úmido (massa de água + massa de sólido seco) (g) e X_{bu} é a umidade em base úmida (g água·g $^{-1}$ de massa total da amostra).

4.2.5.5 Solubilidade

Aproximadamente 1 g de pó de grama de trigo foi adicionada a um recipiente contendo 100 mL de água destilada a 25 °C, sob agitação. Após 1 min, a solução foi filtrada em papel filtro, que posteriormente foi seco em estufa a 60°C por 24 h. A solubilidade foi calculada a partir da fração de material não dissolvido, conforme a Equação 4.9.

$$SOL = 100 - \left[\frac{m_2}{m_1(1 - U_{bu})} \cdot 100 \right] \quad (4.9)$$

Em que SOL é a solubilidade (%), m_1 é a massa (g) inicial da amostra, m_2 é a massa (g) de amostra remanescente no filtro e U_{bu} é a umidade inicial da amostra analisada, em base úmida (g água. g sólido úmido⁻¹) (Dacanal, 2005). As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.5.6 Teste de molhamento

O ensaio consistiu na medição do tempo (s) necessário para o completo molhamento de 1 g de pó adicionado sobre 80 mL de água destilada em temperatura ambiente (Dacanal, 2005). As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.5.7 Determinação da densidade bulk

Aproximadamente 2 g da amostra foram transferidos para uma proveta graduada de 10 mL, a qual foi repetidamente batida sobre uma superfície plana, até estabilização do volume. Com a massa conhecida e o volume final ocupado, a densidade bulk foi calculada e expressa em g·cm⁻³ (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005). As análises foram realizadas à temperatura ambiente.

4.2.5.8 Cor

A cor dos pós foi analisada utilizando um colorímetro digital (CR400 – Minolta Company, Japão), considerando as escalas CIELAB ($L^*a^*b^*$) e CIELAB ($L^*C^*h^{\circ}$). As medições foram expressas em termos da luminosidade L^* , que varia de 0 (preto) a 100 (branco) e da cromaticidade definida por a^* , cujos valores variam de -60 a +60, sendo mais negativos associados à tonalidade verde e mais positivos à tonalidade vermelho; e b^* que também varia de -60 a +60, sendo valores mais negativos indicativo de tonalidade azul e mais positivos de tonalidade amarelo. O croma (C^*) representa a intensidade da cor, em que os valores próximos de 0 indicam tons neutros (acinzentados), enquanto valores maiores indicando cores mais saturadas. Já o ângulo de tonalidade (h°) expressa a tonalidade da cor como um ângulo em graus, variando de 0° a 360°, de acordo com a seguinte distribuição: 0° corresponde ao vermelho, 90° ao amarelo, 180° ao verde, 270° ao azul, 240° ao azul intenso, 270° ao

violeta e 330° ao rosa (Konica Minolta, 2025). A diferença global de cor (ΔE^*) foi obtida usando Equação 4.10:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (4.10)$$

Os subscritos 1 e 2 referem-se às amostras comparadas, geralmente, 1 o padrão e 2 a amostra testada. Para o presente estudo foi utilizado como padrão as amostras *in natura*, sem branqueamento.

4.2.5.9 Compostos bioativos

Os compostos avaliados foram teores de clorofilas, carotenoides, fenólicos totais e flavonoides totais, conforme descrito na sequência. As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.5.9.1 Teores de Clorofila total e Carotenoides

A clorofila e carotenóides foram analisados conforme metodologia descrita por Yadav et al., (2024). O extrato foi preparado misturando 0,3 g do pó de grama de trigo com 25 mL de acetona 80%, seguido de agitação em vórtex (modelo K45-2810, Brasil) por 1 min. Após a mistura, a solução foi centrifugada (Heal Force, modelo Neofuge 15R, China) a 5000 rpm por 5 min, filtrada e armazenada em balão volumétrico. Esse procedimento de extração foi repetido até que todo pigmento fosse extraído, sendo observado o resíduo ao fundo do tubo Falcon incolor. Então, a absorbância dos sobrenadantes foi medida com espectrofotômetro (Kasuaki, modelo IL-592-LC-BI, China) em comprimentos de onda de 645 e 663 nm. O teor de clorofila foi determinado com base nas Equações 4.11 a 4.13, e expressa em mg clorofila total/100 g de amostra em base seca.

$$\text{Clorofila total} = \text{clorofila } a + \text{clorofila } b \quad (4.11)$$

$$\text{Clorofila } a = \frac{(12,3(A_{663}) - 0,86(A_{645}))}{1000 * W} \quad (4.12)$$

$$\text{Clorofila } b = \frac{(19,6(A_{645}) - 3,60(A_{663})) * V}{1000 * W} \quad (4.13)$$

Em que A é a leitura da absorbância (nm), V o volume de acetona 80% utilizado e W a massa da amostra utilizada.

O teor de carotenoides foi determinado a partir da leitura do mesmo extrato em comprimento de onda de 480 nm e 510 nm. O resultado foi expresso em mg carotenoides/100 g de amostra em base seca, conforme a Equação 4.14, em que A é a absorbância (nm) nos dois comprimentos de onda de leitura.

$$\text{Carotenóides} = \frac{(7,60(A_{480}) - 1,49(A_{510})) * V}{1000 * W} \quad (4.14)$$

4.2.5.9.2 Teores de Fenólicos e Flavonoides total

A obtenção do extrato foi realizada segundo método descrito por Savic e Savic Gajic, (2020). Aproximadamente 0,3 g de amostra foi adicionada a 20 mL de metanol em um tubo Falcon. O sistema foi agitado em vórtex por 2 min e, em seguida, submetido a um banho ultrassônico (Sanders Medical modelo SoniClean 6, Brasil) por 10 min. Após esse processo, permaneceu em repouso por 1 hora em local escuro. Os extratos foram então centrifugados (Heal Force, modelo Neofuge 15R, China) a 5000 rpm durante 5 min e filtrados com filtro de papel. Os ensaios foram realizados em triplicata.

A determinação dos fenólicos totais foi realizada pelo método de Folin-Ciocalteu, adaptado de Singleton; Orthofer e Lamuela-Raventós (1999). O teor foi expressa em termos de equivalentes de ácido gálico (EAG), em mg EAG por 100 g de amostra em base seca. Para a análise, 0,5 mL do extrato foram adicionados a um tubo de ensaio, seguido da adição de 2,5 mL de Folin-Ciocalteau (1:10 v/v). A mistura foi mantida em banho termostatizado a 50°C por 5 min. Em seguida, foram adicionados 2,0 mL de carbonato de sódio (75 g/L) e a solução foi novamente agitada e mantida a 50°C por mais 5 min. Após resfriamento em banho de gelo, a leitura foi realizada a 622 nm.

Os teores de flavonoides totais foram determinados de acordo com a metodologia descrita por Rolim et al., (2006), e expressos em termos de equivalentes de rutina (ER), em mg ER por 100 g de amostra em base seca. Para a análise, 0,5 mL do extrato foram misturados com 0,3 mL de nitrito de sódio 5%. Após 5 min adicionaram-se 0,6 mL de cloreto de alumínio 10% e, 6 min depois, 2 mL de hidróxido de sódio 1 M. A leitura foi realizada a 450 nm.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Caracterização da grama de trigo fresca e branqueada

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados da caracterização das folhas de grama de trigo fresca e após o branqueamento.

Tabela 4.5 - Caracterização físico-química das folhas de grama de trigo *in natura* e branqueada.

Propriedade	Fresca	Branqueada
Umidade (% base úmida)	90,66 ^A ±0,37	92,52 ^B ±0,19
Atividade de água	0,963 ^A ±0,18	0,980 ^B ±0,00
<i>L</i> *	10,54 ^A ±0,10	11,12 ^B ±0,08
<i>a</i> *	-7,72 ^A ±0,08	-7,70 ^A ±0,11
Parâmetros de cor <i>b</i> *	10,13 ^A ±0,03	9,83 ^B ±0,06
<i>C</i> *	12,76 ^A ±0,02	12,49 ^A ±0,11
<i>h</i> °	127,27 ^A ±0,39	128,07 ^B ±0,27
Fenólicos Total (g EAG / 100 g b.s.)	12,81 ^A ±0,48	12,62 ^A ±0,78
Flavonoides Total (mg ER /100 g b.s.)	836,61 ^A ±62,27	943,83 ^B ±94,90
Clorofila (mg clorofila / 100 b.s.)	1866,60 ^A ±7,72	1857,72 ^A ±26,73
Carotenoides (mg carotenoides / 100 b.s.)	521,41 ^A ±4,41	546,58 ^B ±1,80

Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão, letras diferentes na mesma linha diferem pelo teste de *t de Student* ($p>0,05$). Fonte: dados da pesquisa.

Na literatura, é reportado que um dos principais desafios na conservação da grama de trigo deve-se ao seu elevado teor de umidade. Esse alto teor de umidade é uma característica típica de brotos e microverdes, pois, sendo plantas jovens em intensa atividade metabólica, a água atua como um meio reacional, facilitando processos bioquímicos essenciais para o crescimento e desenvolvimento (Niroula et al., 2019). No presente estudo, o teor de umidade da grama de trigo colhida com 9 dias foi determinado em aproximadamente 90,66%, valor condizente com o esperado para uma planta jovem e comparável aos resultados obtidos por outros autores. Kulkarni et al. (2006) relataram um teor de 89% de umidade para a grama de trigo com 10 dias de crescimento. Savic e Savic Gajic (2020) observaram um teor de 86,6% para plantas com 9 dias. Özköse; Arslan; Acar (2016) relatam um valor médio de 88%

para grama de trigo com 14 dias de crescimento. Já Chakraborty *et al.* (2023) registraram um teor de umidade de 90% em plantas com 10 dias de crescimento.

Após a realização do branqueamento nas folhas de grama de trigo foi observado um aumento, para 92,52%, no teor de umidade das folhas. Esse resultado pode estar relacionado tanto ao contato direto com a água quente, inerente a esse tratamento térmico, quanto à possível a ruptura das células das folhas, o que favorece a absorção de água. Umas das consequências do branqueamento é a alteração na textura das folhas: quando as folhas são expostas a alta temperatura, há enfraquecimento das paredes celulares e outros componentes estruturais das folhas (Yang *et al.*, 2022).

A atividade da água é definida como a razão entre a pressão de vapor da água presente em um alimento e a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura. Seu valor varia de 0, para alimentos completamente secos, até 1, para a água pura (Pui; Saleena, 2022). Assim valores mais elevados de atividade de água tendem a aumentar a perecibilidade dos alimentos, implicando na necessidade de aplicação de métodos de conservação para garantir a segurança microbiológica e prolongar a vida útil. No presente estudo, a atividade de água das folhas frescas de grama de trigo foi determinada em 0,963, um valor elevado e compatível com o alto teor de umidade observado. Após o branqueamento, houve aumento na atividade de água para 0,980, resultado atribuído à absorção de umidade durante o tratamento térmico.

A coloração da grama de trigo é predominantemente verde, característica associada ao alto teor de clorofila, comum em folhas e gramíneas (Grubišić *et al.*, 2022). O parâmetro L^* , que representa a luminosidade da amostra (0 = preto e 100 = branco), para a grama de trigo sem branqueamento apresentou um valor de 10,54, indicando uma coloração escura. Após o tratamento térmico, houve um leve aumento na luminosidade, com o valor de L^* passando para 11,12. O parâmetro a^* , que varia de valores negativos (tendência ao verde) a positivos (tendência ao vermelho), apresentou um valor negativo, sem alteração significativa com o branqueamento, confirmando a predominância da tonalidade verde, conforme esperado para gramíneas ricas em clorofila. O parâmetro b^* apresentou valores positivos, indicando tendência ao amarelo*, ainda que o branqueamento tenha resultado em uma leve redução. O croma (C^*), que mede a intensidade da cor, foi de 12,76 para a amostra

fresca, sendo considerado um valor baixo, não ocorrendo alteração significativa com o branqueamento. Isso indica uma coloração relativamente opaca e pouco vibrante. Já ângulo de tonalidade (h°), que apresentou leve incremento com o branqueamento, confirmou a tendência ao verde, uma vez que valores superiores a 100° são característicos dessa tonalidade (Konica Minolta, 2025). Por fim, considerando que diferenças globais de cor (ΔE^*) são geralmente perceptíveis acima de 4, o valor obtido de 0,74 indica que não foram observadas alterações visuais perceptíveis na coloração das folhas frescas após o branqueamento (Figura 4.8).

Figura 4.8 - Folhas de grama de trigo a) sem branqueamento, b) após realizar o branqueamento.



Fonte: arquivo pessoal.

As suspensões preparadas a partir das folhas submetidas ao branqueamento térmico apresentaram redução no teor de sólidos totais, passando de $14,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ para $7,11 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ em comparação às suspensões obtidas das folhas não branqueadas. Essa diminuição pode ser explicada pela lixiviação de compostos solúveis para o meio aquoso durante o branqueamento, e pela absorção de água pelo tecido vegetal, que resulta em efeito de diluição. O tratamento térmico provoca alterações na estrutura celular, aumentando a permeabilidade das membranas e facilitando liberação e entrada de compostos na célula (Oboh, 2005)

A suspensão preparada a partir das folhas submetidas ao branqueamento térmico apresentou redução no teor de sólidos totais, passando de $14,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ para $7,11 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ em comparação à suspensão obtida das folhas não branqueadas. Essa diminuição pode ser atribuída à lixiviação de compostos para o meio aquoso durante o branqueamento (Stamatopoulos *et al.*, 2012). Resultados semelhantes foram observados por Martínez *et al.*, (2013), que relataram redução de cerca de 38% nos

sólidos solúveis de folhas de nabo branqueadas por 1 min, indicando a perda de componentes solúveis para o meio de aquecimento.

Os resultados para os parâmetros de cor indicaram a partir dos valores de h° , a manutenção de tendência à tonalidade esverdeada em ambas as amostras, em concordância com o observado nas folhas (Tabela 4.5). Na análise da coloração de extratos da grama de trigo, Islam et al., (2020) reportam valores semelhantes aos encontrados neste trabalho, com amostras escuras, apresentando L^* de 22,72, a^* com tendência ao verde (valor negativo igual a -1,71) e ângulo de tonalidade de 114,66. Özköse; Arslan; Acar, (2016) avaliaram a coloração do suco de grama de trigo com 14 dias de crescimento, processando na proporção 1:4 (água : grama de trigo), obtendo valores com tendência ao verde, com parâmetro a^* de -4,30 e L^* de 24,52. Os trabalhos comparados e o processo de produção da suspensão no presente estudo envolveram um processo de diluição. Essa diluição reduz a concentração de compostos coloridos, permitindo maior reflexão da luz, consequentemente, diminuindo a intensidade de detecção da cor quando comparado aos resultados apresentados para cor da folha da Tabela 4.5.

Conforme verificado na Tabela 4.5, no presente trabalho, as concentrações de clorofila e compostos fenólicos encontradas foram comparáveis às reportadas por outros autores. Para a grama de trigo fresca, o teor de fenólicos totais para a grama de trigo fresca analisada foi de 12,81 g EAG por 100 g de amostra em base seca (sem variação significativa com o tratamento térmico), enquanto o teor de flavonoides totais foi de 836,61 mg ER por 100 g de amostra em base seca (aumentando para 943,83 mg ER por 100 g de amostra em base seca após o branqueamento). Além disso, o teor de clorofila foi de 1866 mg por 100 g de amostra em base seca (sem alteração significativa com o tratamento térmico), e o teor de carotenoides totais foi de 525 mg por 100 g de amostra em base seca (com leve aumento, para 546,58 mg por 100 g de amostra em base seca, após o branqueamento). Para a grama de trigo *in natura* com 7 dias de crescimento Karakas et al., (2022) obtiveram um teor de fenólicos totais de 86,54 mg EAG por g de amostra em base seca e um teor de flavonoides totais de 49,18 mg ER por g de amostra em base seca. Savic; Savic Gajic, (2020) relataram um teor de 15,51 g EAG por 100 g de amostra em base seca para a grama de trigo obtida com 9 dias. Niroula et al., (2019) obtiveram um teor de carotenoides totais de 25,75

mg por 100 g de amostra em base seca e um teor de clorofila total de 36,07 mg por 100 g de amostra em base seca.

Nas folhas em que foi realizado o branqueamento não houve diferença significativas na quantificação de fenólicos totais e para clorofila, sugerindo que o pré-tratamento não degradou esses compostos e pigmentos. Por outro lado, foi observado aumento dos flavonoides (836,61 para 943,83 mg ER por 100 g de amostra em base seca) e carotenoides (521,41 para 546,58 mg por 100 g de amostra em base seca). Os flavonóides são frequentemente encontrados nas plantas na forma ligada a açúcares ou outras moléculas. Já os carotenoides são encontrados no interior dos cloroplastos junto das clorofilas. Quando o calor é aplicado essas ligações e compartimentos são rompidos, permitindo que carotenoides e flavonóides sejam liberados (Stamatopoulos *et al.*, 2012). Assim o branqueamento da grama de trigo possivelmente liberou compostos ligados a estrutura e aprisionado dentro de compartimentos celulares, devido ao relaxamento causado pela expansão celular do processo.

Os compostos bioativos e pigmentos presentes nas células de folhas e vegetais podem sofrer alterações estruturais durante o processo de branqueamento. Quando o tecido celular é amolecido ou rompido, esses compostos tornam-se mais acessíveis, o que pode facilitar sua extração. No entanto, eles também podem ser perdidos por degradação térmica ou lixiviação na água, dependendo do binômio tempo-temperatura de exposição ao calor (Lim *et al.*, 2025; Stamatopoulos *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2022).

Stamatopoulos *et al.* (2012) relataram que, quando aplicado a folhas de oliveira, o branqueamento por imersão por 2 min em água fervente permitiu um aumento na quantificação de fenólicos totais. Segundo os autores, o processo favoreceu a quebra de moléculas grandes complexas, como taninos, gerando compostos fenólicos mais simples e, consequentemente, um aumento no conteúdo de total de fenólicos.

4.3.2 Secagem da grama de trigo por spray drying

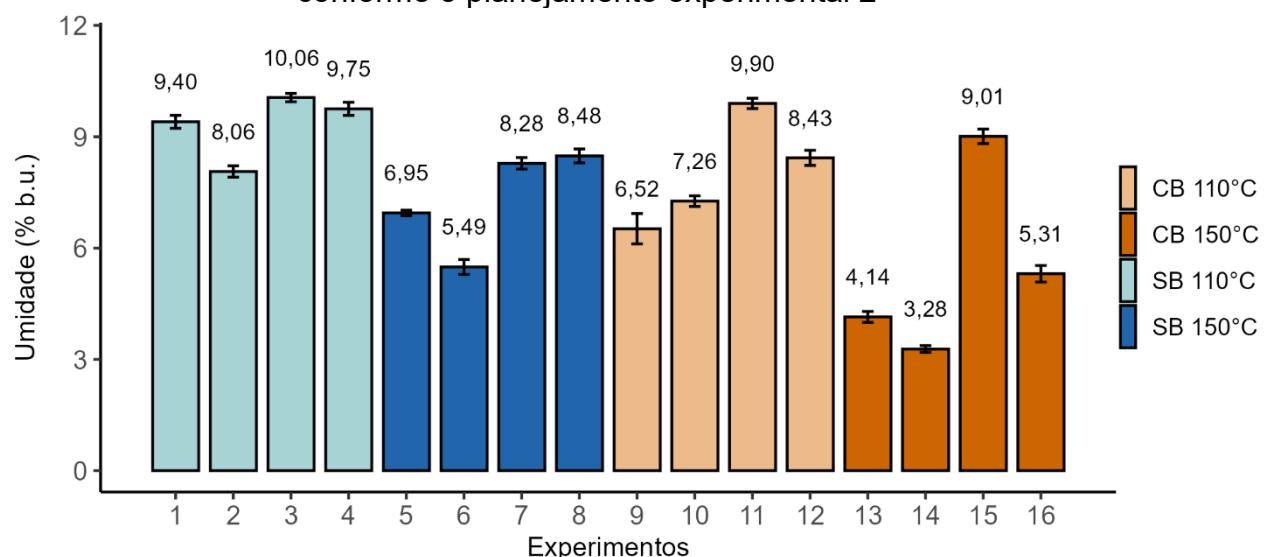
4.3.2.1 Planejamento fatorial 2⁴

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos realizados conforme o planejamento fatorial a dois níveis completo com quatro fatores, 2⁴, para a secagem da grama de trigo em spray dryer.

4.3.2.1.1 Umidade e atividade de água

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados experimentais de umidade em base úmida dos pós de grama de trigo nas diferentes condições estudadas, conforme apresentado no planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.9 – Teor de umidade final dos pós de grama seca por spray drying conforme o planejamento experimental 2⁴



Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Nos pós obtidos a partir de folhas submetidas ao branqueamento, o teor de umidade variou de 3,28 a 9,90%, enquanto nos pós sem branqueamento a umidade variou de 5,49 a 10,06%. O maior valor de umidade (10,06%) foi observado no experimento 3, conduzido sob as condições de temperatura de 110°C, vazão de alimentação de 0,8 L·h⁻¹ e vazão do ar de secagem de 1,1 m³·min⁻¹, na amostra que não foi submetida ao tratamento térmico. O uso de temperaturas mais baixas, como 110°C, resultou na produção de pós com maior teor de umidade devido à menor taxa de transferência de calor e, consequentemente, de massa. Já o menor valor de

umidade (3,28%) foi obtido no experimento 14, realizado sob as condições de temperatura de 150°C, vazão de alimentação de 0,4 L·h⁻¹ e vazão do ar de secagem de 1,5 m³·min⁻¹, na amostra qual foi aplicado o tratamento térmico. A operação com temperatura e vazão de ar de secagem mais elevadas levou a um pó com menor teor de umidade devido à maior taxa de transmissão de calor.

Conforme observado na Figura 4.9 os menores teores de umidade foram obtidos em experimentos conduzidos com o ar de secagem a 150°C, associados a uma menor vazão de alimentação. Nos experimentos 5 e 6, realizados sem branqueamento, sob temperatura de 150°C, os teores de umidade foram de 6,95 e 5,49%, respectivamente. Para as mesmas condições experimentais, mas com a aplicação do branqueamento, os valores de umidade foram de 4,14 e 3,28%. O uso de temperaturas mais elevadas promove uma maior taxa de transferência de calor devido ao gradiente de temperatura entre as gotículas e o ar de secagem fornecido, favorecendo a evaporação da água. Além disso, uma menor vazão de alimentação proporciona a formação de gotas menores, que favorecem maior área superficial para contato com o ar de secagem, levando a um processo de secagem mais eficiente (Braga *et al.*, 2020).

Além da temperatura, a umidade do produto também é influenciada por outros fatores operacionais, como a vazão de alimentação e a vazão do ar de secagem. Uma vazão de alimentação mais elevada pode contribuir para uma maior umidade final, pois aumenta a carga líquida dentro da câmara de secagem, reduzindo a eficiência de remoção de umidade do processo. Isso pode ocorrer porque uma maior vazão de solução introduzida em um curto período pode resultar em menor tempo de residência das partículas na câmara, limitando a evaporação da umidade. Além disso, uma vazão de alimentação muito alta pode causar um leve resfriamento do ar de secagem, reduzindo o gradiente térmico necessário para uma secagem eficiente. Dessa forma, o aumento da umidade final do pó observado pode ser atribuído não apenas à temperatura, mas também à elevada vazão de alimentação utilizada naquelas condições experimentais.

Na Tabela 4.6, são apresentados os resultados dos efeitos estimados ($\alpha = 10\%$) das variáveis independentes na análise estatística da resposta de umidade do pó da grama de trigo obtido por *spray drying*.

Tabela 4.6 - Efeitos e valores de p para umidade do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	p
Média	7,5209	0,0000
X ₁	-1,5780	0,0249
X ₂	-2,3055	0,0057
X ₃	2,2637	0,0062
X ₄	-1,0239	0,0951

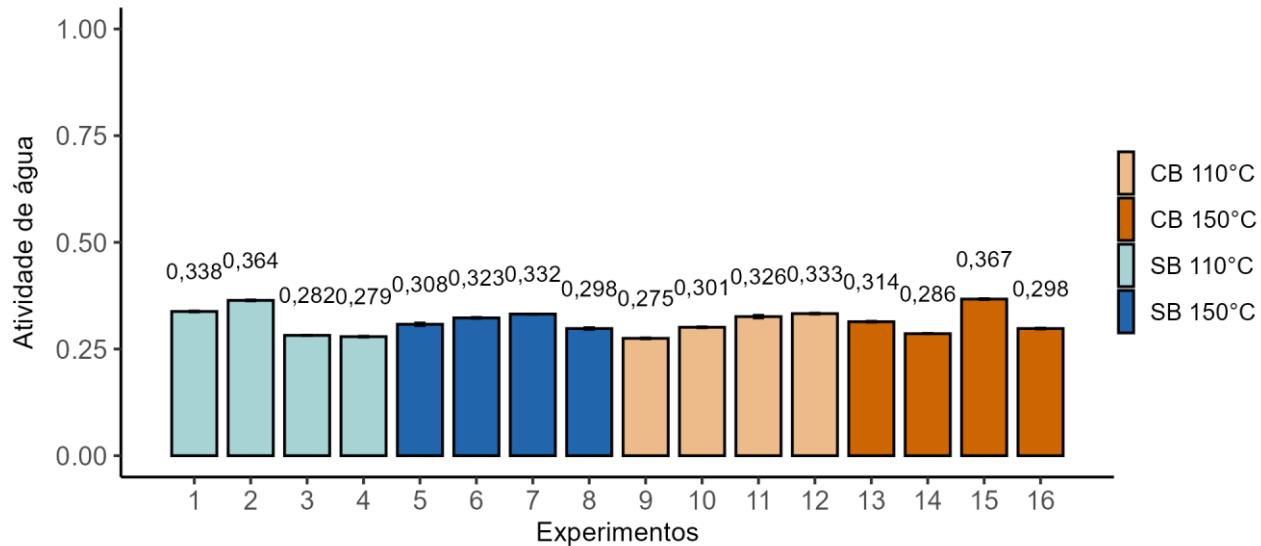
Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento), X₂ à temperatura, X₃ à vazão de alimentação e X₄ à vazão do ar de secagem. Fonte: dados da pesquisa.

A partir da análise dos efeitos quantificados apresentados na Tabela 4.6 observou-se que todas as variáveis estudadas foram significativas por meio de seus efeitos principais. O efeito negativo do branqueamento indica que a realização desse tratamento térmico contribuiu para redução da umidade no pó de grama de trigo. Além disso, verificou-se que o aumento da temperatura resultou em menores umidades, conforme evidenciado pelo efeito negativo dessa variável.

O aumento da vazão de alimentação levou ao incremento da umidade no pó final conforme revelado pelo efeito positivo desse fator de variação. Vazões mais altas aumentam a quantidade de material líquido entrando no secador, o que pode resultar em partículas mais úmidas em maior adesão às paredes da câmara, devido à dificuldade na remoção da umidade da gota (Silva; Andrade; Barrozo, 2024). Observou-se também um efeito negativo da vazão de ar de secagem, indicando que seu aumento favoreceu a dispersão das partículas, promovendo um melhor contato entre a superfície da partícula com o ar de secagem, favorecendo a troca de calor por convecção, o que resultou em menor umidade no pó obtido. Como resultado, há maior fornecimento de energia para a evaporação da água, promovendo a redução da umidade no pó final. O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos (regressão) foi de 0,9239. Assim como para as regressões apresentadas na sequência, na análise estatística para as demais respostas, os resíduos foram distribuídos de forma independente e aleatória de acordo com uma distribuição normal com média zero e variância constante.

Os resultados experimentais de atividade de água são mostrados na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Teor de atividade de água dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme o planejamento experimental 2⁴



Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Os valores de atividade de água dos pós obtidos variaram de 0,275 a 0,367, estando bem abaixo do limite crítico de 0,6, considerado, em geral, seguro para a conservação de alimentos em pó (George *et al.*, 2023). A baixa atividade de água reflete a eficiência do processo de secagem por *spray drying* na redução da quantidade de água livre, fator essencial para limitar o crescimento microbiano e diminuir a taxa de reações químicas, como oxidação e escurecimento não enzimático, que podem comprometer a qualidade do produto ao longo do tempo (George *et al.*, 2023). Para esta resposta, a estimativa dos efeitos apresentou um coeficiente de determinação (R^2) baixo.

4.3.2.1.2 Rendimento

A secagem por atomização tem como objetivo a obtenção de pó a partir de um líquido (suspensão, solução ou emulsão), sendo assim, o rendimento é um parâmetro crítico a ser avaliado na otimização de secagem. O rendimento do processo de *spray drying* é influenciado pelo projeto do equipamento, pelos parâmetros operacionais e pelas propriedades do material que é alimentado no secador (Dantas *et al.*, 2023).

Em um processo contínuo, após perdas iniciais por aderência (nas paredes da câmara de secagem, do ciclone e das tubulações), o processo de *spray drying* tende a apresentar maior rendimento ao atingir o estado estacionário (Yousefi; Emam-Djomeh; Mousavi, 2011). No presente estudo, foi utilizado um *spray dryer* de escala

laboratorial e, devido às dimensões reduzidas da câmara de secagem, nem todas as partículas estavam suficientemente secas ao colidirem com as paredes do secador, resultando em níveis de umidade que favoreceram a aderência, o que impactou o rendimento da secagem. As perdas de material ocorreram principalmente por aderência no ciclone e na saída do ar de exaustão, conforme visualizado na Figura 4.11.

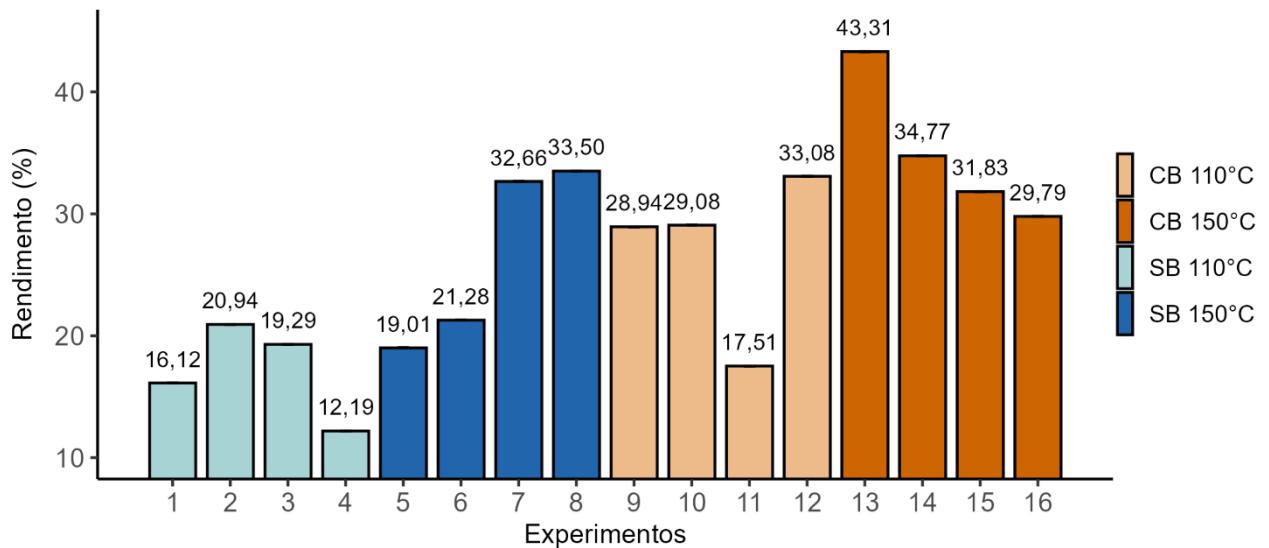
Figura 4.11 - Adesão das partículas no equipamento *spray dryer*: a) câmara de secagem, b) interior do ciclone, c) saída superior do ciclone (*overflow*)



Fonte: arquivo pessoal.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados experimentais de rendimento da secagem da grama de trigo nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.12 - Rendimento do processo de *spray drying* dos experimentos do planejamento fatorial 2⁴

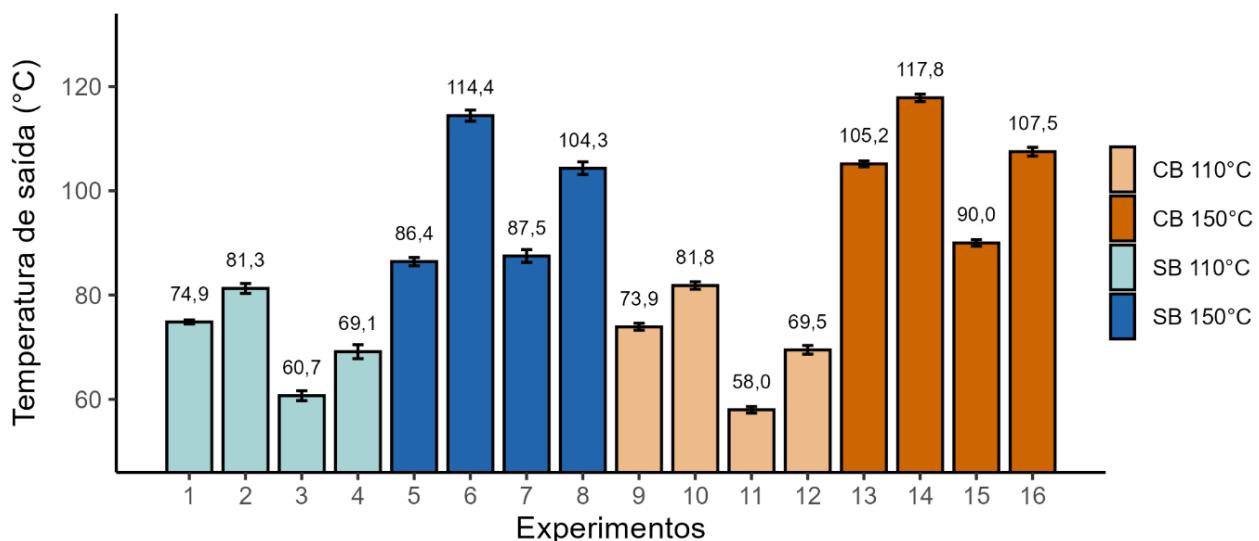


Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em que: SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: Dados de pesquisa.

O menor rendimento obtido no processo de secagem por *spray drying* foi observado no Experimento 4 (SB, 110°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,5 m³·min⁻¹), com um valor de 12,19%, enquanto o maior rendimento foi encontrado no experimento 13 (CB, 150°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹), alcançando 43,31%, com 43,31%. Conforme destacado, a condição com maior rendimento (43,31%) corresponde à amostra submetida ao tratamento térmico (branqueamento), e seca com uma temperatura do ar de secagem de 150°C, vazão de alimentação de 0,4 L·h⁻¹ e vazão de ar de 1,1 m³·min⁻¹. A combinação dessas variáveis – aplicação do tratamento térmico, maior temperatura, menor vazão de alimentação e menor vazão de ar (entre os níveis avaliados) - parece ter favorecido a evaporação da umidade e a redução da aderência do pó às paredes do equipamento, resultando em maior recuperação de sólidos. Nota-se que, de modo geral, essas foram também as condições que levou aos menores teores de umidade nos pós, como observado nos experimentos 13 (4,14%) e 14 (3,28%). Por outro lado, o menor rendimento (12,19%) foi registrado no experimento 4, conduzido com a amostra sem branqueamento, à temperatura de 110°C, vazão de alimentação de 0,8 L·h⁻¹ e vazão de ar de secagem de 1,5 m³·min⁻¹. Destaca-se que todas as condições operacionais no experimento de menor rendimento foram distintas daquelas que resultaram no maior rendimento, reforçando a influência conjunta das variáveis de processo sobre a eficiência da secagem.

Na Figura 4.13 são observados os valores médios da temperatura da corrente de ar com partículas de pó seco, medida na saída da câmara de secagem e entrada no ciclone do da unidade experimental. Observa-se que o aumento da vazão de alimentação de 0,4 para 0,8 L·h⁻¹ levou à redução da temperatura de saída do ar em todas as condições avaliadas. O menor rendimento, obtido no experimento 4, esteve associado a uma temperatura média de saída de 69°C. Por outro lado, no experimento 2, realizado em condições semelhantes, mas com uma vazão de 0,4 L·h⁻¹, a temperatura média de saída foi de 81°C, resultando em um rendimento de 20,94%.

Figura 4.13 - Temperatura do ar na saída da câmara de secagem



Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Em relação à vazão do ar de secagem, observou-se que a combinação de uma menor vazão de ar com uma maior vazão de alimentação resultou em produtos com maior teor de umidade (Figura 4.9), além de maior aderência às superfícies internas do secador, reduzindo o rendimento. Nas condições com maior vazão de alimentação, o menor tempo de residência das partículas na câmara pode ter reduzido o tempo disponível para a completa evaporação da umidade. Além disso, a menor velocidade do ar nas condições de baixa vazão pode ter comprometido a eficiência de coleta no ciclone, favorecendo perdas de material com o ar de exaustão.

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados da quantificação dos efeitos dos fatores relacionados às variáveis independentes, considerando tanto os efeitos

principais (de cada variável de forma isolada) quanto as interações entre elas, obtidos para a resposta de rendimento do processo de secagem.

Tabela 4.7 - Efeitos e respectivos valores de p para o rendimento de secagem, para a análise estatística do planejamento fatorial 2^4

Fator	Efeito	Valor de p
Média	26,3097	0,0000
X_1	5,9538	0,0491
X_2	5,4164	0,0638
X_1X_3	-8,7310	0,0149
X_2X_4	-5,8200	0,0523

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X_1 corresponde ao tratamento térmico (branqueamento), X_2 à temperatura, X_3 à vazão de alimentação e X_4 à vazão do ar de secagem. Fonte: dados da pesquisa.

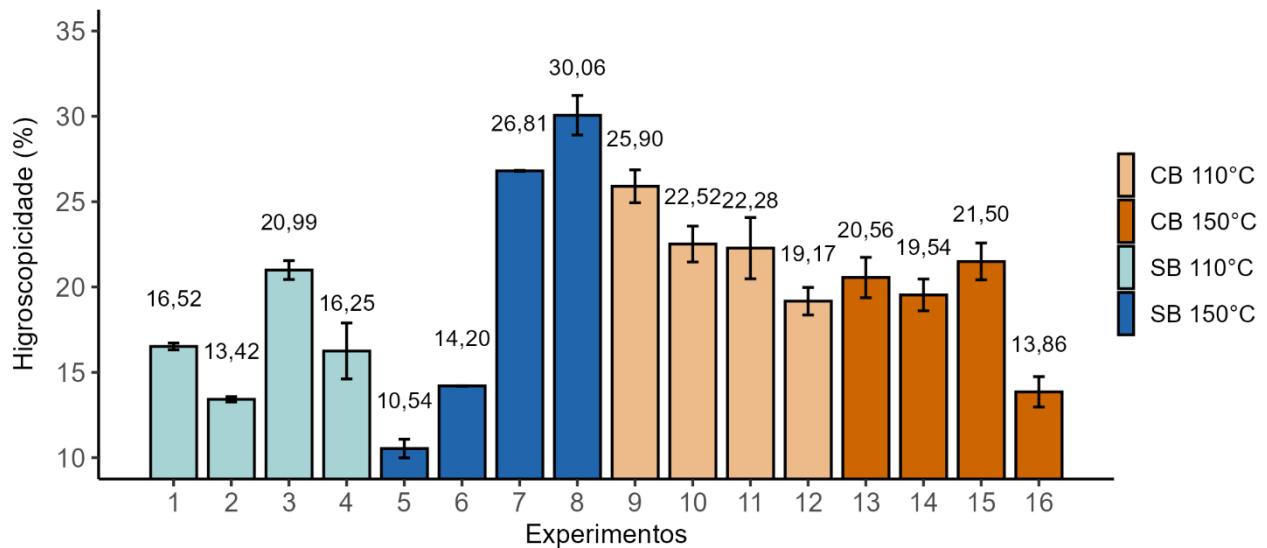
Como apresentado na Tabela 4.7, todas as variáveis analisadas foram significativas para o rendimento do processo. Devido às interações significativas entre o tratamento térmico (branqueamento) e a vazão de alimentação, e entre a temperatura e a vazão de alimentação, não é possível interpretar o efeito principal de cada uma dessas variáveis apenas com base em seu sinal. Entretanto, os resultados da Figura 4.12 indicam que os ensaios realizados com amostras submetidas ao branqueamento tenderam a apresentar maiores rendimentos. O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos (regressão) foi de 0,9309.

4.3.2.1.3 Higroscopicidade

A higroscopicidade é a capacidade do material em adsorver a umidade do ambiente. Essa propriedade é particularmente significativa no contexto dos alimentos em pó, pois materiais higroscópicos tendem a adsorver umidade, o que pode levar à aglomeração e endurecimento do produto (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005; Srivastava *et al.*, 2022). Callahan *et al.*, (1982) classificam os pós em pouco higroscópicos, aqueles que absorvem menos de 10% do seu peso, moderadamente higroscópicos que absorvem entre 10 e 30% do seu peso, e muito higroscópicos aqueles que adsorvem mais de 30% do seu peso.

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados experimentais de higroscopicidade dos pós de grama de trigo, obtidos nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.14 - Resultados de higroscopicidade dos pós de grama de trigo seca por *spray drying*, de acordo com o planejamento experimental 2⁴



Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Os valores de higroscopicidade do pó de grama de trigo secos por *spray drying* variaram de 10 a 30%, assim conforme classificação feita por Callahan *et al.*, (1982) variaram do pouco ao moderadamente higroscópico. A comparação entre os tratamentos com e sem branqueamento mostrou que embora o branqueamento tenha reduzido a umidade final em algumas condições, não foi eficaz na diminuição da higroscopicidade quando a temperatura de secagem e a vazão de alimentação foram elevadas. No Experimento 7 (SB, 150°C, 0,8 L·h⁻¹), apesar da umidade final ter sido menor (8,28%), a higroscopicidade permaneceu elevada, (26,81%). Em temperaturas mais baixas (110°C), os experimentos com branqueamento apresentaram menores valores de higroscopicidade, como no Experimento 9 (CB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹), em que a umidade final foi de 6,52% e a higroscopicidade alcançou 25,90%.

Quando exposta a altas temperaturas, como na secagem, a degradação térmica da clorofila se inicia com a conversão da clorofila em feofitina, por meio da remoção dos íons magnésio, e em clorofilida, por perda do grupo fitol, podendo influenciar a higroscopicidade do pó. A clorofilida, por ser hidrossolúvel, tende a aumentar a higroscopicidade, enquanto a feofitina pode reduzi-la (Ferruzzi; Blakeslee, 2007; Hayes; Ferruzzi, 2020). Para os pós sem branqueamento (SB), os menores valores de higroscopicidade observados em algumas condições podem estar associados a uma menor degradação da clorofila em compostos hidrossolúveis.

Os resultados dos efeitos estimados das variáveis independentes na análise estatística para a resposta da higroscopicidade do pó de grama de trigo seca por *spray drying* são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Efeitos e valores de p para a higroscopicidade do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	Valor de p
Média	19,6315	0,0000
X ₃	3,4655	0,0955
X ₁ X ₂	-3,605	0,0860
X ₁ X ₃	-6,3925	0,0129

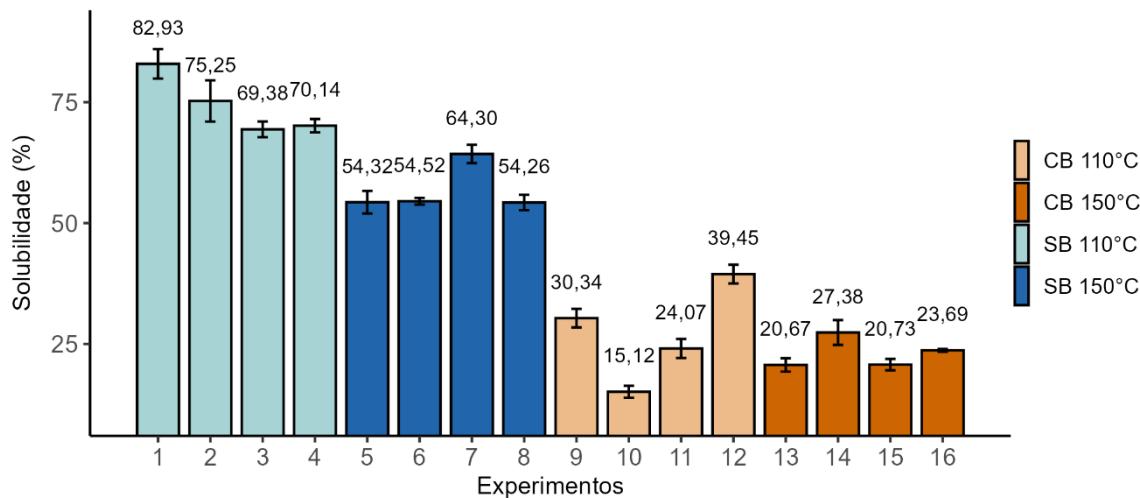
Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento), X₂ à temperatura, X₃ à vazão de alimentação e X₄ à vazão do ar de secagem. Fonte: dados da pesquisa.

A análise de efeitos estimados apresentadas na Tabela 4.8 mostras que todas as variáveis influenciaram a higroscopicidade do pó, seja de forma isolada ou por meio de interações. Devido às interações significativas entre os fatores tratamento térmico (branqueamento), temperatura e vazão de alimentação, não é possível interpretar o efeito principal de cada uma dessas variáveis apenas com base em seu sinal, como discutido para o efeito da vazão do ar de secagem. O coeficiente de determinação (R²) para a regressão foi de 0,8661.

4.3.2.1.4 Solubilidade

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados experimentais de solubilidade da grama de trigo submetida à secagem em diferentes condições.

Figura 4.15 - Resultados de solubilidade dos pós de grama de trigo seca por spray drying, conforme o planejamento experimental 2⁴

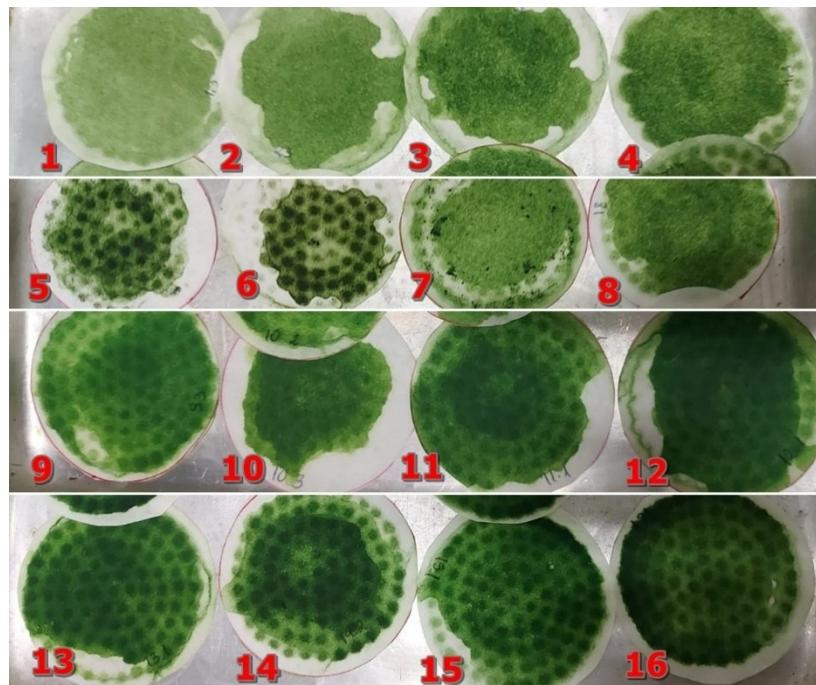


Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Os valores de solubilidade dos pós de grama de trigo variaram, conforme as diferentes condições estudadas, de 15,12 no experimento 10 (CB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,5 m³·min⁻¹) a 82,93% no experimento 1 (SB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹), ou seja, o maior valor foi obtido na amostra não submetida ao tratamento térmico, sob os menores níveis de temperatura, vazão de alimentação e vazão de ar de secagem. De modo geral, observou-se que os experimentos realizados sem branqueamento apresentaram maiores solubilidades, com valor mínimo de 54%, em comparação aos experimentos com branqueamento. Verifica-se ainda que, na amostra branqueada, menores temperaturas de secagem favoreceram a obtenção de pós mais solúveis, enquanto, nas amostras sem tratamento térmico, a variação da temperatura tendeu a não exercer influência sobre a solubilidade.

Durante a realização dos ensaios de solubilidade, foi observada a formação de grumos, o que dificultou a solubilização, deixando resíduos no papel filtro durante a etapa de filtração a vácuo (Figura 4.16).

Figura 4.16 - Visualização dos experimentos de solubilidade para os 16 experimentos



Fonte: arquivo pessoal

A análise estatística dos efeitos é apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Efeitos e valor de p do para a solubilidade o pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	Valor de p
Média	43,8035	0,0000
X ₁	-18,6215	0,0007
X ₂	-7,0326	0,0225
X ₁ X ₂	4,9687	0,06324

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento) e X₂ à temperatura. Fonte: dados da pesquisa.

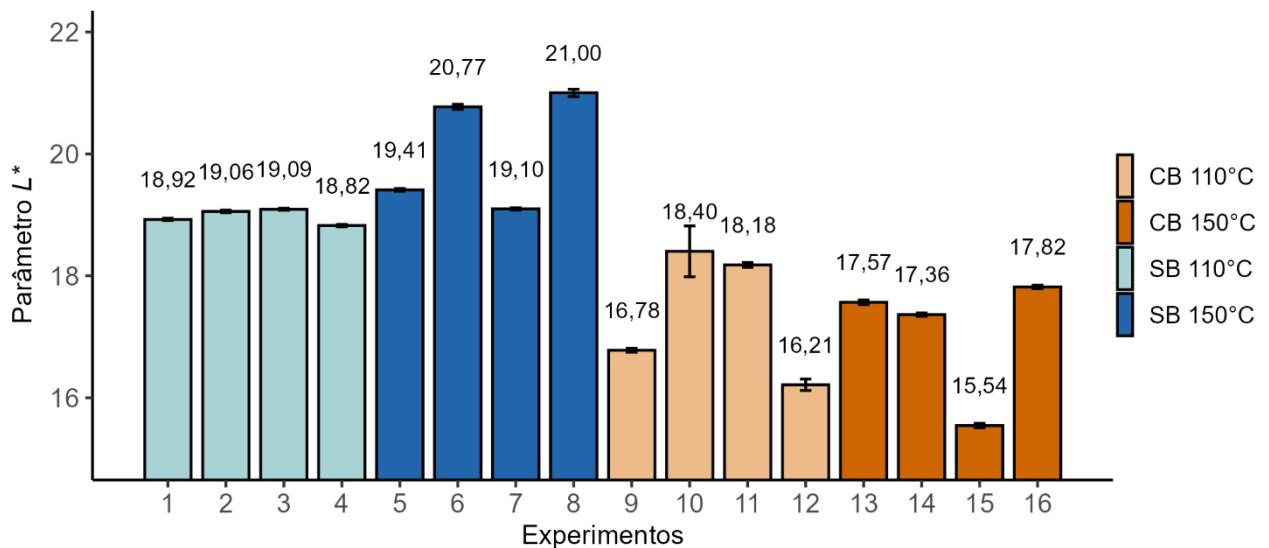
A análise de efeitos estimados, apresentados na Tabela 4.9, mostrou que apenas as variáveis tratamento térmico (branqueamento) e temperatura, considerando seus efeitos principais e de interação, influenciaram significativamente a solubilidade dos pós de grama de trigo. O maior efeito principal da variável tratamento térmico indica maior influência do branqueamento na solubilidade. O efeito negativo, relativamente mais intenso que sua interação com a temperatura, sugere que esse tratamento térmico tendeu a reduzir a solubilidade dos pós. O branqueamento pode ter contribuído para a liberação de compostos do interior celular, devido ao seu efeito sobre a parede celular. Esse processo envolve o rompimento das

células, facilitando a liberação de compostos hidrofílicos. Entre esses, destacam-se gomas, componentes de membrana e alguns pigmentos como a clorofila presente na grama de trigo, os quais podem tornar o pó resultante menos suscetível à absorção de água (Feng *et al.*, 2021; Nayak; Liu; Tang, 2015). Ainda durante a secagem, pode ocorrer a oxidação de macromoléculas presentes no material, como carboidratos e proteínas, levando à formação de novas ligações químicas e estruturas menos solúveis em água. Esse fenômeno pode reduzir a capacidade de interação do pó com a água, impactando negativamente sua solubilidade (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005; Burgain *et al.*, 2017; Selomulya; Fang, 2013). O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos foi de 0,9725.

4.3.2.1.5 Cor

Na Figura 4.17 são apresentados os resultados experimentais de luminosidade (L^*) dos pós de grama de trigo seca nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.17 - Resultados de caracterização de L^* da grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2⁴



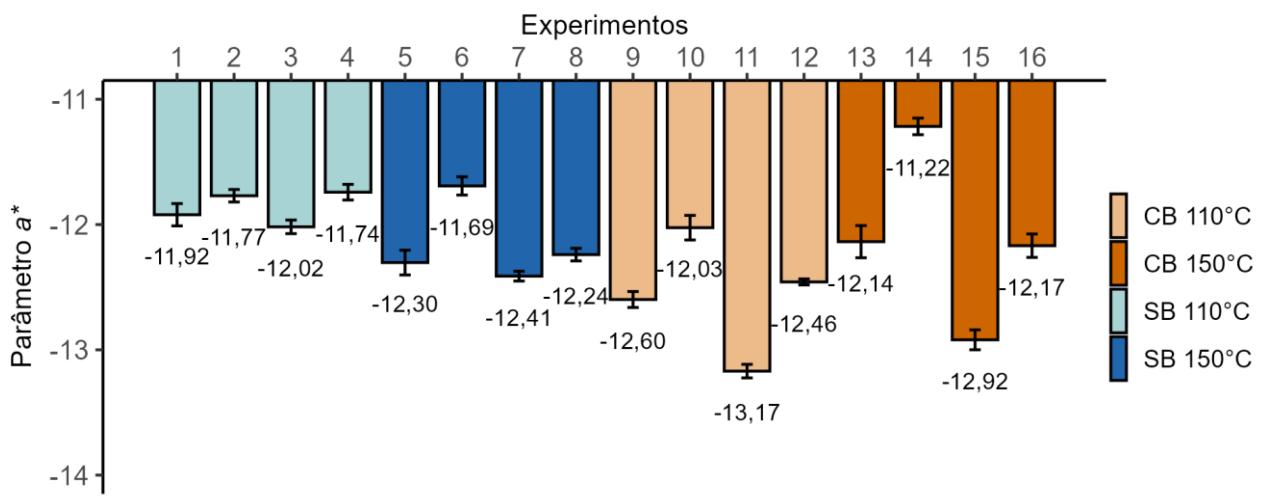
Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Em comparação com as amostras *in natura*, todos os pós apresentaram aumento nos valores de L^* , indicando maior luminosidade após o processo de secagem. Por exemplo, a amostra *in natura* sem branqueamento apresentou L^* de 10,54 (Tabela 4.5), enquanto no experimento 1 (SB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·m⁻¹), o valor subiu para 18,93. No experimento 8 (SB, 150°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,5 m³·m⁻¹), o parâmetro L^* alcançou o maior valor, chegando a 21,00. A exposição da suspensão

temperaturas elevadas pode ter contribuído para esse aumento de luminosidade, possivelmente devido à degradação de pigmentos naturais, como a clorofila e carotenoides, associada também ao menor teor de umidade dos pós produzidos nessas condições quando comparados à amostra in natura. Com o aumento da temperatura de secagem de 110°C para 150°C, o ganho de luminosidade nas amostras branqueadas foi modesto, com o L^* passando de 16,78 no experimento 9 (CB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹) para 17,57 no experimento 13 (CB, 150°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹). Em ambas as condições, os valores permaneceram inferiores aos obtidos nas amostras sem branqueamento processadas nas mesmas temperaturas e vazões de alimentação e ar. O menor L^* entre os pós branqueados foi registrado no experimento 15 (CB, 150°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹), com 15,54.

O parâmetro a^* , que representa a tonalidade na direção verde (valores negativos) e vermelho (valores positivos), é um indicador relevante para a coloração dos pós de grama de trigo, cuja principal característica visual é a coloração verde. Na Figura 4.18 são apresentados os resultados experimentais do parâmetro a^* dos pós de grama de trigo seca nas diferentes condições estudadas, conforme o planejamento experimental descrito no item 4.2.3.

Figura 4.18 - Resultados de caracterização do parâmetro a^* da grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2⁴



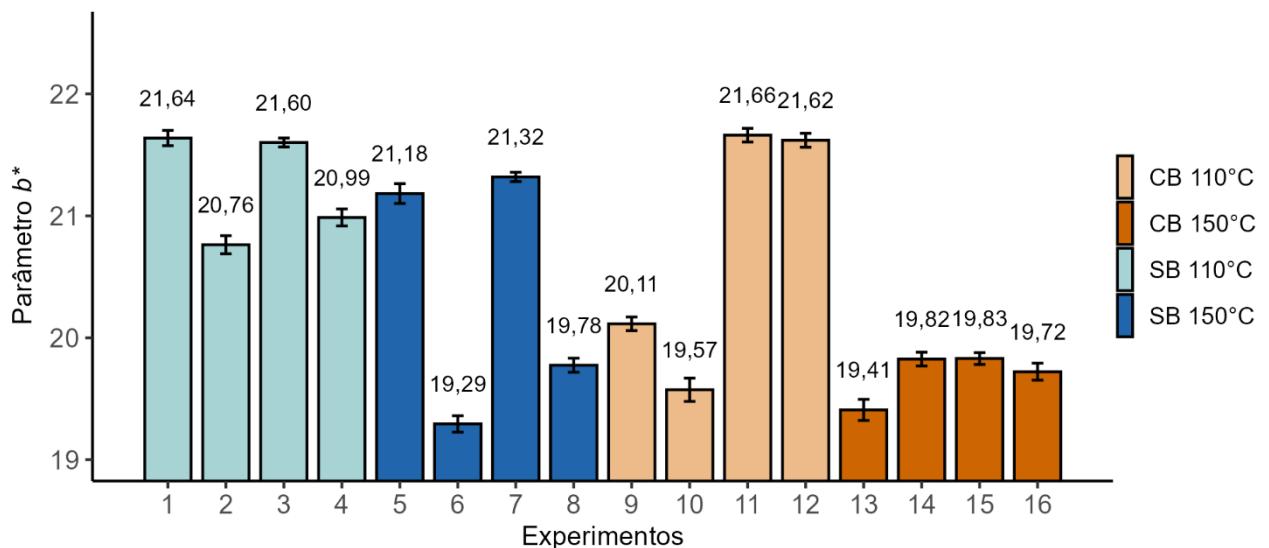
Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Conforme apresentado na Figura 4.18 observou-se que os pós obtidos a partir da grama de trigo sem branqueamento apresentaram valores de a^* maiores, ou seja, mais próximos do neutro, quando comparado aos pós da grama de trigo com

branqueamento. De modo geral, os experimentos realizados a 110°C com branqueamento (experimentos 9 a 12) tenderam a resultar em tonalidades de verde mais intensas, com valores de a^* mais negativos, em comparação às amostras sem branqueamento processadas na mesma temperatura (experimentos 1 a 4). Esse comportamento sugere que, a 110°C, o branqueamento exerceu um efeito protetor sobre a clorofila, minimizando sua degradação. Já nas amostras sem branqueamento, essa proteção não ocorreu, resultando em uma coloração verde menos intensa, provavelmente devido à degradação térmica da clorofila (Ferruzzi; Blakeslee, 2007; Hayes; Ferruzzi, 2020). Por outro lado, a 150°C, o branqueamento não foi benéfico ao parâmetro a^* . Nessa condição, os pós obtidos sem branqueamento (experimentos 5 a 8) tenderam a presentar valores de a^* mais negativos, indicando maior intensidade de verde em comparação às amostras branqueadas (experimentos 13 a 16). Esse resultado sugere que o branqueamento, ao romper as estruturas celulares, pode ter deixado a clorofila mais exposta ou mais sensível à degradação térmica durante a secagem a temperaturas elevadas, como 150°C.

Na Figura 4.19 são apresentados os resultados experimentais do parâmetro b^* dos pós de grama de trigo seca nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.19 - Resultados de caracterização do parâmetro b^* da grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2⁴



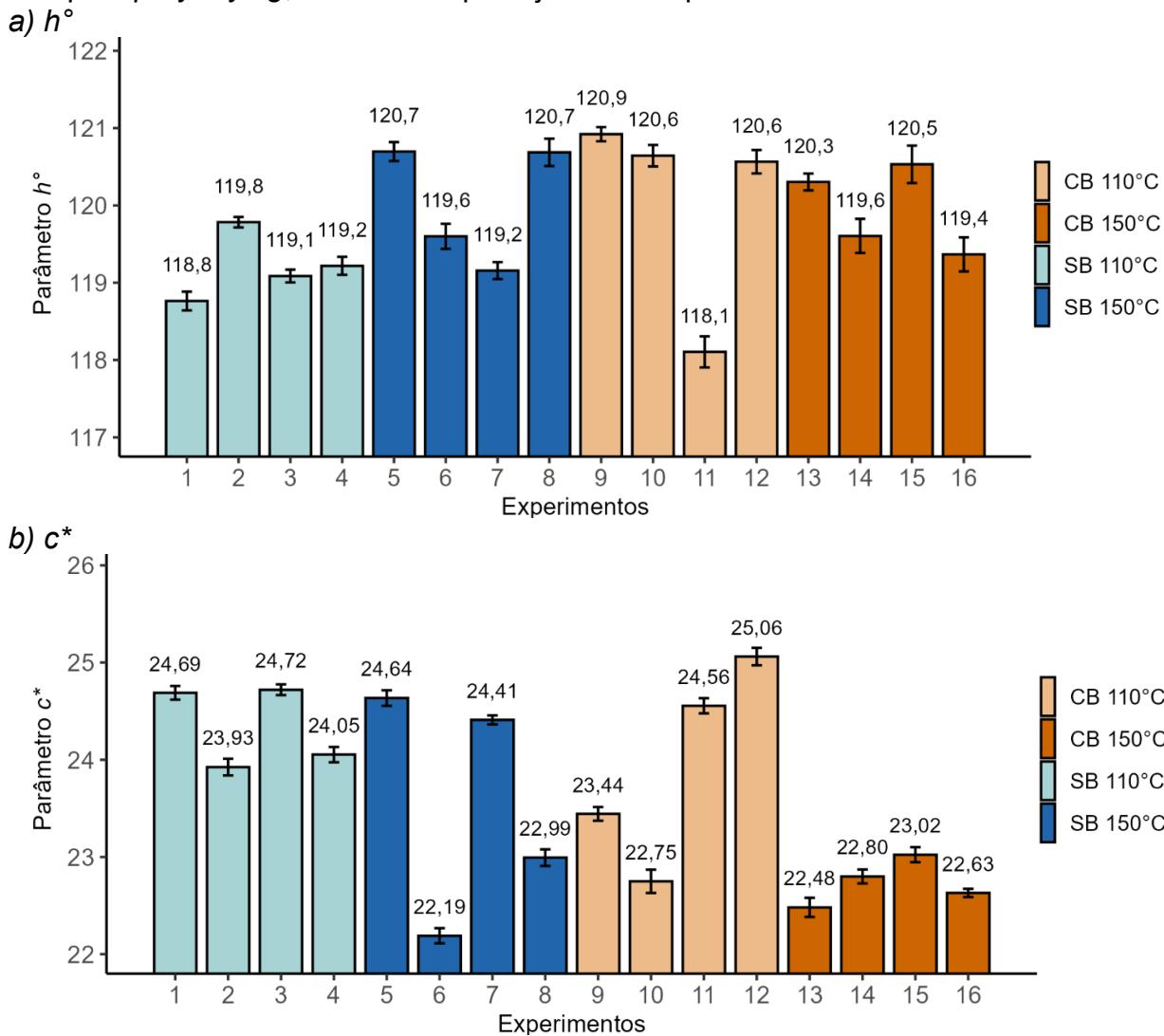
Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Nos resultados apresentados na Figura 4.19 observou-se que, para ambas as condições, os valores de b^* foram significativamente superior aos obtidos para as

folhas frescas, cujos valores foram 10,13 (sem branqueamento) e 9,83 (com branqueamento), conforme visualizado na Tabela 4.3. Nos pós, os valores de b^* foram superiores a 18, indicando uma intensificação da tonalidade amarela, muito provavelmente em decorrência da degradação da clorofila. De modo geral, os maiores valores de b^* tenderam a ser obtidos na condição sem branqueamento. Nos experimentos 1, 2, 3, 5, 7 e 8 os valores de b^* foram maiores que os obtidos nas condições correspondentes dos pós submetidos ao branqueamento, o que sugere que o branqueamento pode ter exercido um efeito protetor, inibindo a degradação da clorofila. Além disso, destaca-se o efeito da temperatura: a 150°C os pós apresentaram valores de b^* menores em comparação a 110°C, tanto para as condições com quanto sem branqueamento. Merecem destaque os experimentos 6 (SB, 150°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,5 m³·min⁻¹) e 13 (CB, 150°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹), cujos valores mais baixos podem estar associados à formação de pigmentos amarronzados derivados da degradação da clorofila em feofitina e derivados (Hayes; Ferruzzi, 2020).

A degradação da clorofila pode ser evidenciada por alterações nos parâmetros de cor a^* e ângulo de Hue (h°), uma vez que a aumento em direção a valores positivos de a^* e as variações em h° afastando-se de 180° são indicativos de perda da tonalidade verde característica da clorofila. Na Figura 4.20 são apresentados os resultados experimentais do parâmetro c^* e h° dos pós de grama de trigo seca nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.20 - Resultados de caracterização do parâmetro C^* e h° da grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2⁴



Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Os valores de h° visualizados apresentados na Figura 4.20a variando entre 118° e 121°C, indicam predominância de tonalidades verde-amarela nos pós. Observou-se que os pós obtidos com branqueamento a 110°C tenderam a apresentar valores ligeiramente mais elevados do que os pós obtidos sem branqueamento, o que sugere uma maior preservação da tonalidade verde. Isso provavelmente se deve ao efeito protetor do pré-tratamento aplicado. Como exemplo, o experimento 3 (SB, 110°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹) apresentou valor de h° de 119,09°, enquanto o experimento 11 (CB, 110°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹) apresentou 118,11°. A intensidade da cor representada pelo parâmetro C^* na Figura 4. 20b foi, em geral, maior nos pós

obtidos sem branqueamento, indicando uma saturação de cor mais elevada nessas amostras.

Considerando a importância da coloração como indicativo da qualidade dos pós de grama de trigo, foi realizada uma regressão múltipla para estimar os efeitos das variáveis independentes sobre as respostas representadas pelos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* . Os resultados dessa análise estatística para as respostas L^* , a^* e b^* são apresentados, nas Tabelas 4.10. Para esta resposta (h°), os efeitos estimados não foram significativos para um nível de significância de 10%, indicando que as variáveis avaliadas não influenciaram de forma relevante no ângulo de tonalidade. O coeficiente de determinação (R^2) da estimativa foi de 0,8281.

Tabela 4.10 - Efeito e valor de p para os parâmetros de cor L^* , a^* e b^* do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Parâmetro de cor					
	L^*		a^*		b^*	
	Efeito	Valor de p	Efeito	Valor de p	Efeito	Valor de p
Média	18,3777	0,0000	-12,1745	0,0000	20,5198	0,0000
X ₁	-2,32896	0,0081	-0,3244	0,0018	-0,6008	0,0811
X ₂	-	-	-	-	-0,9504	0,0183
X ₃	-	-	-0,4331	0,0005	0,5896	0,0854
X ₄	-	-	0,521	0,0002	-0,6500	0,0648
X ₁ X ₂	-0,7634	0,0500	0,3755	0,0009	-	-
X ₁ X ₃	-	-	-0,2519	0,0055	-	-
X ₁ X ₄	-	-	0,2181	0,0099	0,5813	0,0887
X ₂ X ₃	-	-	-0,1649	0,0281	-	-
X ₂ X ₄	0,7766	0,0476	-	-	-	-
X ₃ X ₄	-	-	-	-	-	-

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$); (-) efeito com p maior que 0,1. Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento), X₂ à temperatura, X₃ à vazão de alimentação e X₄ à vazão do ar de secagem. Fonte: dados da pesquisa.

A análise de regressão múltipla apresentada na Tabela 4.10 mostra que o fator tratamento térmico, de forma isolada e por interação com a temperatura, influenciou de forma significativa a luminosidade dos pós obtidos. O sinal negativo do efeito associado a essa variável indica uma tendência de que o branqueamento contribua para a obtenção de pós mais escuros (menores valores de L^*). No entanto, esse comportamento não pode ser afirmado devido ao efeito de interação significativo

desse fator. O tecido vegetal íntegro protege os compostos internos da célula, com o branqueamento, essa estrutura é enfraquecida, liberando compostos que durante a secagem são degradados formando compostos mais escuros. Além disso, estruturas com presença de açúcares ficam mais expostas ao calor, favorecendo reações de escurecimento não enzimático (Cai *et al.*, 2021). As variáveis temperatura e vazão de ar de secagem influenciaram significativamente por meio de interações. O coeficiente de determinação (R^2) para a regressão múltipla foi de 0,9325.

A partir da Tabela 4.10, observou-se que todas as variáveis influenciaram na variação do parâmetro de cor a^* (relacionado à tonalidade verde) dos pós obtidos, seja por efeito principal ou por interação. Como os efeitos apresentaram valores próximos em módulo, não é possível determinar a predominância de um sobre o outro. Além disso, como interações para todos os fatores foram significativas, a interpretação do sentido dos efeitos na resposta não pode ser baseada apenas no sinal dos efeitos principais. O coeficiente de determinação (R^2) para a regressão múltipla foi de 0,9834.

A análise de efeitos quantificados para o parâmetro b^* , visualizada na Tabela 4.10, mostra que todas as variáveis avaliadas foram significativas. A tendência de intensificação da tonalidade amarela, considerando o sinal negativo dos efeitos principais dos fatores branqueamento, temperatura e vazão de ar de secagem, pode ser atribuída à degradação da clorofila, à concentração de carotenóides e às condições operacionais. Quando a clorofila se degrada, esses pigmentos secundários podem se tornar mais visíveis, contribuindo para o aumento da coloração amarela. O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos foi de 0,8760.

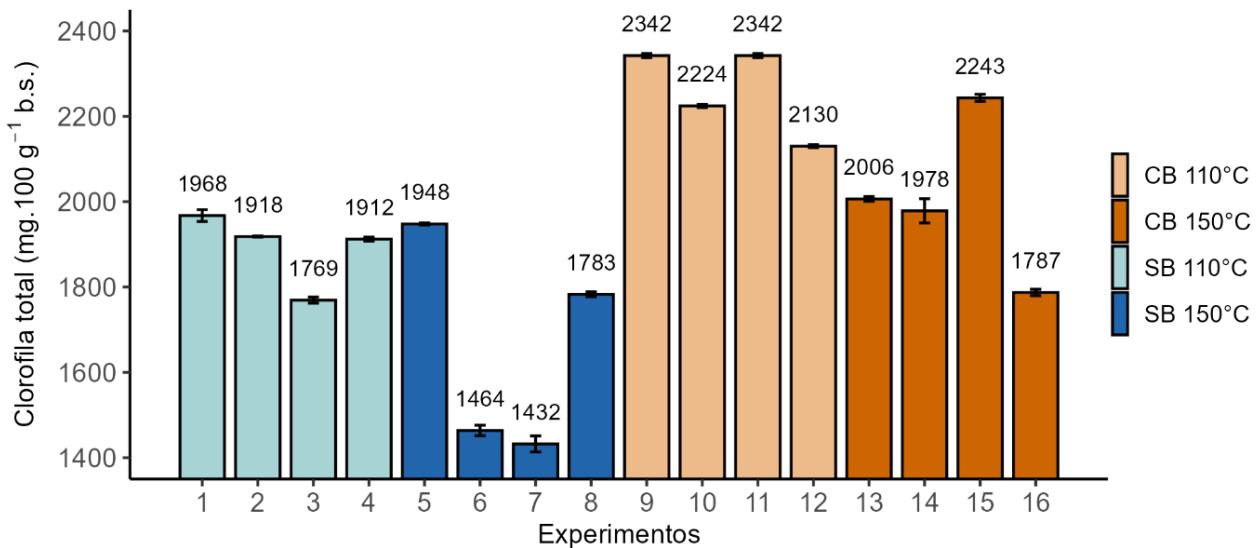
4.3.2.1.6 Compostos bioativos

Nesta seção, serão apresentados os resultados da análise dos compostos bioativos realizadas no pó de grama de trigo obtido por *spray drying*, incluindo a clorofila, os carotenoides, os compostos fenólicos totais os flavonoides totais.

4.3.2.1.6.1 Clorofila

Além da função principal de produção de energia, a clorofila da grama de trigo contribui para benefícios à saúde como ação antioxidante (Mishra *et al.*, 2025). Na Figura 4.21 são apresentados os resultados experimentais de teor de clorofila dos pós da grama de trigo seca por *spray drying* nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.21 - Resultados do teor de clorofila nos pós de grama de trigo seca por spray drying, conforme o planejamento experimental 2⁴



Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

Os valores do teor de clorofila nos pós de grama de trigo variaram de 1432 no experimento 7 (SB, 150°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹) a 2342 mg por 100 g de amostra em base seca. experimento 9(CB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹). Os resultados apresentados na Figura 4.21 indicam que o tratamento térmico afetou os níveis de clorofila: de modo geral, a secagem de amostras branqueadas resultou em pós com maiores teores desse composto em comparação às amostras que não passaram por branqueamento. Nos pós obtidos a partir de amostras branqueadas, os valores de clorofila variaram de 1787 (experimento 16) a 2342 mg por 100 g de amostra em base seca (experimento 9), enquanto nos obtidos sem branqueamento os valores oscilaram entre 1432 (experimento 7) e 1968 mg por 100 g de amostra em base seca (experimento 1). No experimento 1 (SB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹) o teor de clorofila foi de 1967 mg por 100 g de amostra em base seca, ao passo que no experimento 9, realizado sob as mesmas condições de temperatura, vazão de ar de secagem e vazão de alimentação, mas com amostras branqueadas, teor aumentou para 2342 mg por 100 g de amostra em base seca. Ao analisar a solubilidade dos pós (Figura 4.15), observou-se que os obtidos a partir de amostras branqueadas apresentaram menor solubilidade. Considerando que eles também apresentaram maiores teores de clorofila, pigmento com propriedades hidrofílicas, é possível que essa característica tenha contribuído para a redução da solubilidade observada nesses pós.

Os resultados dos efeitos estimados (análise estatística) das variáveis independentes para a resposta do teor de clorofila do pó de grama de trigo seca por *spray drying* são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Efeito e valor de p para o teor de clorofila do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	Valor de p
Média	1953,030	0,0000
X ₁	357,574	0,0186
X ₂	-245,508	0,0650

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento) e X₂ à temperatura. Fonte: dados da pesquisa.

A análise de efeitos quantificados na Tabela 4.11 revelou que apenas as variáveis branqueamento e temperatura influenciaram significativamente ($\alpha = 10\%$) o teor de clorofila dos pós de grama de trigo, de forma isolada (efeitos principais). O branqueamento apresentou o efeito mais intenso, conforme indicado pelo maior valor em módulo. O aumento de clorofila observada após o branqueamento térmico (efeito positivo) pode ser explicado por modificações estruturais causadas pelo tratamento. As clorofilas são encontradas no interior dos cloroplastos da célula vegetal. A expansão da célula causada pela absorção de água durante o branqueamento favorece a desestruturação das paredes celulares e das membranas dos cloroplastos, facilitando a liberação da clorofila aprisionada na matriz vegetal, o que aumenta sua extração e detecção durante análises (Oliveira; Brandão; Silva, 2016; Severini *et al.*, 2016). Além disso, o branqueamento inativa enzimas oxidativas, como a clorofilase, que são responsáveis pela degradação da clorofila, contribuindo para sua preservação (Ferruzzi; Blakeslee, 2007; Stamatopoulos *et al.*, 2012). Por outro lado, o efeito principal negativo da temperatura do ar de secagem indica que o aumento de 110 para 150°C reduziu o teor de clorofila nos pós, devido a degradação térmica do pigmento. O coeficiente de determinação (R^2) para a regressão múltipla foi de 0,8026.

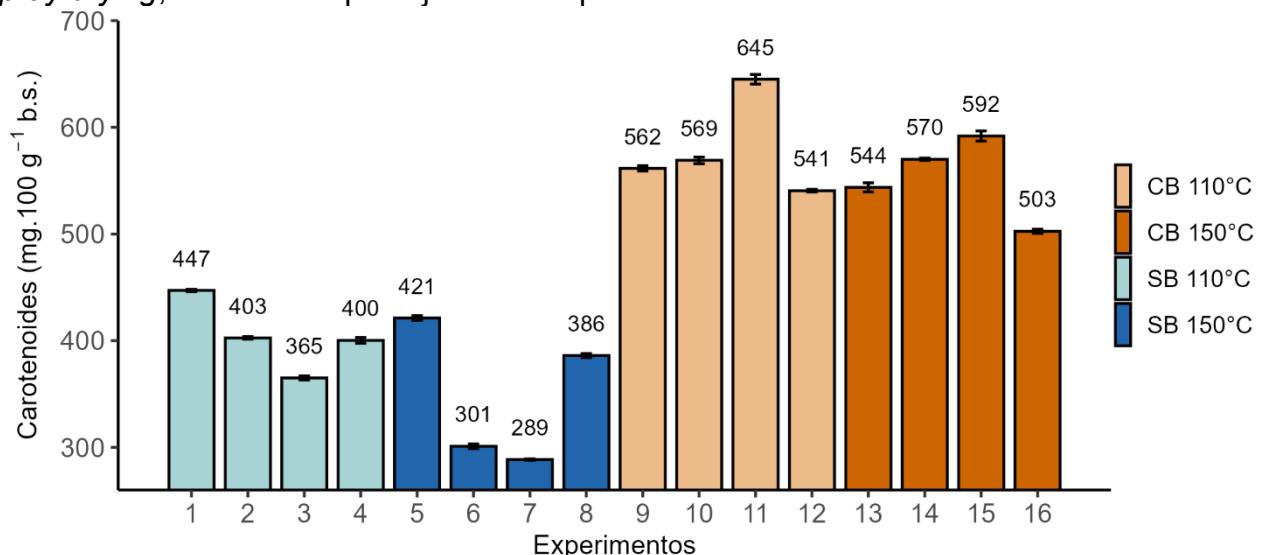
Devi *et al.* (2019) compararam a secagem da grama de trigo por liofilização, estufa e secagem natural à sombra. A liofilização foi o método que melhor preservou a clorofila, resultando em 3,61 g por 100 g de amostra em base seca, enquanto a secagem à sombra apresentou 2,35 g por 100 g de amostra em base seca e a secagem em estufa, 2,14 g por 100 g de amostra em base seca. Pardeshi *et al.* (2013)

avaliaram a secagem da grama de trigo por meio de secagem solar com ar forçado, obtendo um teor de clorofila de 0,134 g por 100 g de matéria seca. Já Chakraborty *et al.* (2023) ao utilizarem secagem por leito fluidizado, observaram que o aumento da temperatura de secagem de 50 a 70°C resultou na redução do teor de clorofila, com valores variando entre 200 e 600 mg por 100 g de amostra úmida.

4.3.2.1.6.2 Carotenoides

Na Figura 4.22 são apresentados os resultados experimentais de teor carotenoides totais dos pós da grama de trigo seca por *spray drying* nas diferentes condições estudadas.

Figura 4.22 - Resultados do teor de carotenoides nos pós de grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2⁴



Em que SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

De modo geral, as secagens realizadas com amostras submetidas ao tratamento térmico (experimentos de 9 a 16) tenderam a produzir pós de grama de trigo com teores de carotenoides totais maiores em comparação do que àqueles obtidos a partir das amostras secas sem branqueamento (experimentos de 1 a 8). Assim, semelhante aos resultados encontrados para o teor de clorofila, o branqueamento tendeu a favorecer a preservação dos carotenoides, cujos teores variaram entre 503 e 645 mg por 100 g de amostra em base seca, indicando um efeito protetor do tratamento térmico. Nos experimentos sem branqueamento o teor de carotenoides variou entre 289 e 447 mg por 100 g de amostra em base seca.

O menor teor de carotenoides, 289 mg por 100 g de amostra em base seca, foi observado no experimento 7 (SB, 150°C, 0,8 L·h⁻¹ e 1,1 m³·min⁻¹). Já o maior teor foi obtido no 11 (CB, 110°C, 0,8 L·h⁻¹ e 1,1 m³·min⁻¹), atingindo 645 mg por 100 g de amostra em base seca, sugerindo um efeito deletério da não aplicação prévia do branqueamento e da operação em temperatura elevada. Ainda em relação ao experimento 11 (melhor resultado), o valor obtido foi superior ao do encontrado no experimento 9, realizado em condições semelhantes (CB, 110°C e 1,1 m³·min⁻¹), porém com vazão de alimentação menor (0,4 L·h⁻¹), o que resultou em 562 mg por 100 g de amostra em base seca. A maior retenção de carotenoides no experimento 11 pode estar relacionada ao aumento do tamanho das gotas formadas com a maior vazão de alimentação (0,8 L·h⁻¹). Gotas maiores tendem a reduzir a exposição dos carotenoides ao ar de secagem, minimizando sua degradação. Em contrapartida, a vazão de 0,4 L·h⁻¹, gera gotas menores, que apresentam maior área de contato com o ar quente, favorecendo perdas por oxidação ou degradação térmica. Os teores de carotenoides obtidos neste estudo foram superiores aos relatados por Pardeshi et al. (2013), que encontraram 127 mg por 100 g de amostra em base seca, na grama de trigo submetida à secagem solar. Os resultados de regressão múltipla para estimar os efeitos das variáveis independentes sobre o teor de carotenoides totais são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Efeitos e valor de p para o teor de carotenoides totais do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	Valor de p
Média	471,028	0,000
X ₁	189,047	0,002

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento). Fonte: dados da pesquisa.

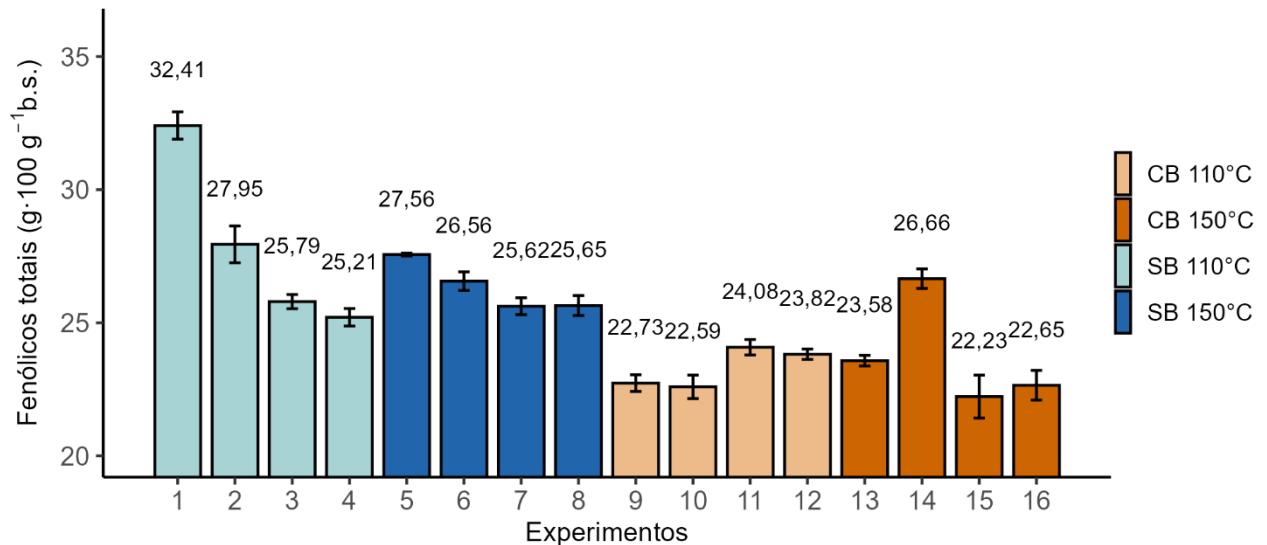
Observa-se que apenas o tratamento térmico teve efeito significativo sobre a variável resposta de carotenoides. O efeito principal positivo indica que o branqueamento favoreceu a conservação de carotenoides totais. Esses compostos estão localizados principalmente nos cloroplastos das células vegetais, onde atuam na captura de energia da luz e sua transferência para a clorofila, aumentando a eficiência da fotossíntese (Pérez-Gálvez; Viera; Roca, 2020). Além disso, os carotenoides protegem as células contra danos foto-oxidativos causados pelo excesso de luz, neutralizando os radicais livres gerados durante a fotossíntese, que podem ser

prejudiciais às células vegetais (Dhami; Cazzonelli, 2020). Com o branqueamento, ocorre amolecimento das paredes celulares, o que pode favorecer a liberação de nutrientes, como os carotenoides, e, consequentemente, aumentar sua extração e detecção analítica. Adicionalmente, a inativação de enzimas oxidativas, como peroxidases, contribui para a preservação desses compostos em posterior processamento, como na secagem (Wang *et al.*, 2020). Dessa forma, branqueamento realizado exerceu efeito protetor sobre os carotenoides, sobretudo pela inativação de enzimas, auxiliando na preservação desses pigmentos durante o processo de secagem. Por serem compostos pouco solúveis em água, os carotenoides - assim como a clorofila -, podem ter contribuído para diminuição da solubilidade observada dos pós de grama de trigo com branqueamento. O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos foi de 0,8840.

4.3.2.1.6.3 Fenólicos totais

Na Figura 4.23 são apresentados os resultados experimentais de fenólicos totais dos pós de grama de trigo obtidos nas diferentes condições de secagem.

Figura 4.23 - Resultados do teor de compostos fenólicos totais nos pós de grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2^4



Em que: SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa.

A partir da Figura 4.23 observa-se que os pós obtidos a partir da secagem sem branqueamento apresentaram teores ligeiramente superiores de compostos fenólicos totais em comparação aos obtidos a partir de amostras branqueadas. Os teores de fenólicos totais variaram de 25,21 a 32,41 g de ácido gálico por 100 g de amostra em

base seca nas amostras sem branqueamento, enquanto nas branqueadas oscilaram entre 22,23 e 26,61 g de ácido gálico por 100 g de amostra em base seca. Destaca-se que o maior teor de compostos fenólicos foi registrado no experimento 1 (SB, 110°C, 0,4 L·h⁻¹, 1,1 m³·min⁻¹), com 32,41 g de ácido gálico por 100 g de amostra em base seca. Sob as mesmas condições operacionais, mas com temperatura elevada a 150°C (no experimento 5), o teor caiu para 22,73 g de ácido gálico por 100 g de amostra em base seca, sugerindo que temperaturas mais baixas favorecem a preservação desses compostos.

Os resultados da quantificação dos efeitos dos fatores para a resposta dos compostos fenólicos totais, obtidos por regressão múltipla (análise estatística), são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Efeito e valor de p para o teor de fenólicos totais do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	Valor de p
Média	25,3183	0,0000
X ₁	-3,5512	0,0141

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento). Fonte: dados da pesquisa.

A análise dos efeitos estimados apresentada na Tabela 4.13, mostra que apenas a variável de tratamento térmico foi significativa. Isso indica uma tendência predominante de que o pré-tratamento resultou na redução dos compostos fenólicos nos pós. Os compostos fenólicos são metabólicos secundários que desempenham diversas funções nas células das plantas, atuando em processos bioquímicos, como mecanismos de defesa e como componentes estruturais. Devido à variedade funções, esses compostos são encontrados em diferentes compartimentos celulares (De Araújo *et al.*, 2021). Geralmente, os fenólicos estão presentes em formas conjugadas, como ésteres e amidas, e não como ácidos livres (Karakaya, 2004). Durante o processo de branqueamento, ocorre maior disponibilidade de compostos fenólicos totais, pois o amolecimento e a ruptura dos constituintes celulares facilitam a liberação de fenólicos ligados, especialmente os ácidos fenólicos. Como resultado, uma maior quantidade desses compostos torna-se disponível para extração e detecção (Deng *et al.*, 2019; Nayak; Liu; Tang, 2015). Por outro lado, quando são submetidos a altas temperaturas, como no processo de secagem, os compostos fenólicos podem sofrer

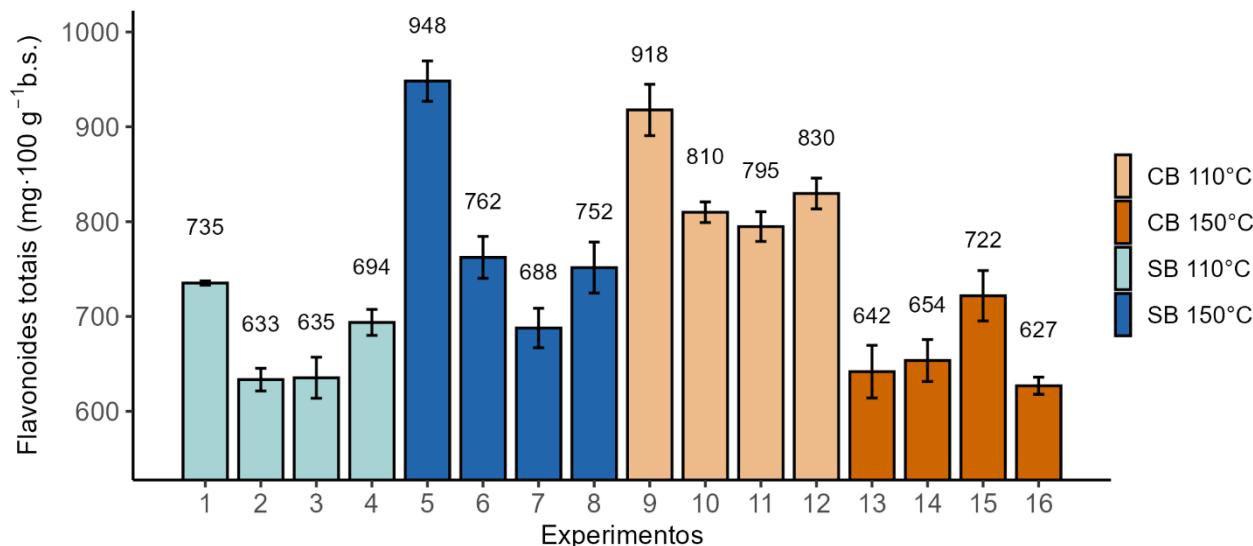
reações de polimerização, formando novos compostos ou sofrer a degradação da estrutura fenólica original, o que reduz a capacidade antioxidante (Deng *et al.*, 2019). Assim, mesmo que resíduos desses compostos ainda estejam presentes, sua detecção pode ser comprometida. O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos foi de 0,9082.

Chakraborty et al. (2023) ao estudarem a secagem da grama de trigo em leito fluidizado, observaram redução no teor de fenólicos totais que em temperaturas de secagem 65°C e 70°C, com valores variando entre 11,7 e 12,8 g de ácido gálico por 100 g de amostra em base seca. Os autores atribuíram essa degradação à exposição prolongada ao calor, especialmente em tempos superiores a 120 min.

4.3.2.1.6.4 Flavonoides totais

Na Figura 4.24 são apresentados os resultados experimentais de flavonoides totais dos pós da grama de trigo obtidos nas diferentes condições de secagem.

Figura 4.24 - Resultados do teor de flavonoides nos pós de grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o planejamento experimental 2⁴



Em que: SB corresponde à condição de sem branqueamento e CB com branqueamento. Fonte: dados da pesquisa. Fonte: dados da pesquisa.

Os teores de flavonoides obtidos para as amostras sem branqueamento variaram de 633 a 948 mg de rutina por 100 g de amostra em base seca, enquanto as amostras com branqueamento variaram de 627 a 918 mg de rutina por 100 g de amostra em base seca. Os resultados da regressão múltipla, com os efeitos estimados

das variáveis independentes sobre o teor de flavonoides totais são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Efeito e valor de p para o teor de flavonoides totais do pó da grama de trigo, conforme a análise estatística do planejamento fatorial 2⁴

Fator	Efeito	Valor de p
Média	742,0994	0,0000
X ₂	-61,7920	0,0811
X ₃	-74,8641	0,0483
X ₁ X ₂	-174,8547	0,0028
X ₃ X ₄	85,5305	0,0322

Efeitos significativos a 90% de confiança ($p \leq 0,10$). Em que X₁ corresponde ao tratamento térmico (branqueamento) e X₂ à temperatura. Fonte: dados da pesquisa. Fonte: dados da pesquisa.

Os resultados da quantificação dos efeitos apresentados na Tabela 4.14 mostram que todas as variáveis influenciaram significativamente o teor de flavonoides totais. Embora a interação entre branqueamento e temperatura tenha sido significativa, o sentido negativo tanto do efeito principal do tratamento térmico quanto da interação sugere uma tendência de intensificação da degradação de flavonoides com a combinação dos maiores níveis dessas variáveis. Nas células vegetais, os flavonóides são encontrados em formas glicosiladas ou esterificadas, podendo estar ligados a moléculas de açúcar ou outros a grupos, o que influenciam sua biodisponibilidade (Shen *et al.*, 2022). Um dos principais efeitos do processamento térmico, como branqueamento, é a ruptura das paredes celulares das plantas, o que pode levar à liberação de flavonóides que antes estavam ligados a outros compostos intracelulares (Ahmed; Eun, 2018). A degradação térmica dos flavonoides ocorre principalmente devido às altas temperaturas que levam à oxidação e alterações estruturais (Feng *et al.*, 2021). Assim, a maior disponibilidade desses compostos promovida pelo branqueamento, associada ao aumento da temperatura de secagem, pode ter favorecido sua degradação térmica, afetando a extração e detecção durante as análises.

Embora a interação entre vazão de alimentação e temperatura também tenha sido significativa, o sentido negativo tanto do efeito principal da vazão de alimentação quanto da interação indica uma tendência de redução no teor de flavonoides totais com a combinação dos maiores níveis dessas variáveis. A tendência de redução dos flavonoides totais com o aumento da vazão de alimentação pode estar relacionada à

formação de partículas maiores e ao aumento da carga líquida introduzida no sistema. Essas condições podem comprometer a eficiência da secagem, resultando em partículas com maior umidade residual. A presença de umidade em partículas parcialmente secas, associada à exposição ao ar quente, pode criar um ambiente propício à degradação térmica e oxidativa de compostos sensíveis, como os flavonoides. O coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa dos efeitos foi de 0,9363.

4.3.2.2 *Planejamento composto central rotacional*

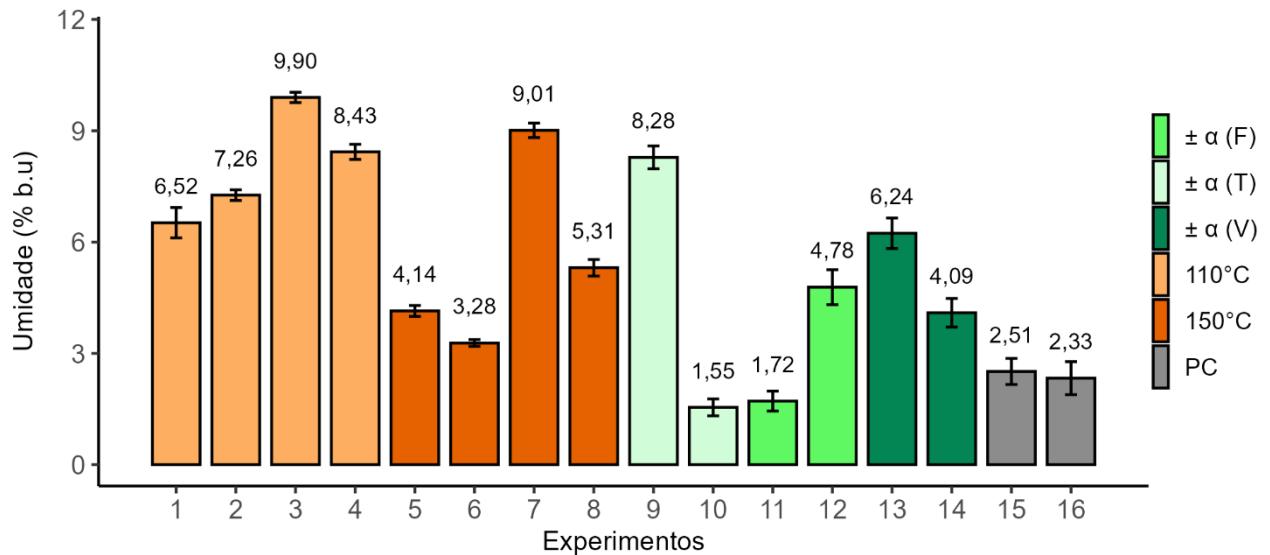
O planejamento fatorial 2^4 permitiu avaliar os efeitos lineares e as interações entre os fatores. No entanto, esse delineamento não é suficiente para modelar as respostas quando há possíveis não linearidades no sistema (Burgain *et al.*, 2017; Yolmeh; Jafari, 2017).

No caso da secagem da grama de trigo, os resultados do planejamento fatorial 2^4 indicaram que a aplicação do tratamento térmico impactou significativamente, e de forma desejável, algumas variáveis respostas, como o aumento da concentração de clorofila (possivelmente pela maior disponibilidade de compostos bioativos) no pó e tendência à redução do teor de umidade e ao aumento do rendimento do processo. Por outro lado, como a temperatura, a vazão de alimentação e a vazão do ar de secagem foram avaliadas em apenas dois níveis no planejamento fatorial, não foi possível investigar possíveis comportamentos não lineares dentro das faixas experimentais adotadas. Desta forma, aplicou-se um planejamento composto central rotacional (PCCR), expandido a partir de um planejamento fatorial 2^3 obtido do 2^4 inicial, com o objetivo de avaliar com maior precisão os efeitos das variáveis independentes e identificar eventuais curvaturas nas superfícies de resposta.

4.3.2.2.1 Umidade e atividade de água

A Figura 4.25 mostra os resultados experimentais de umidade dos pós de grama de trigo nas diferentes condições avaliadas.

Figura 4.25 - Teor de umidade final dos pós de grama de trigo seca por *spray drying*, conforme PCCR



Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

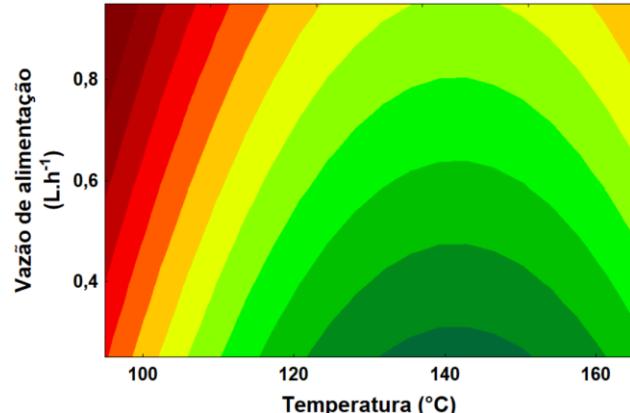
Observa-se que os maiores valores de umidade ocorreram a 110°C, com destaque para o experimento 3 (9,90%). Os menores valores foram registrados nos pontos centrais e no ponto axial de maior temperatura (experimentos 15, 16 e 10), sugerindo que a temperatura teve influência na resposta.

A equação empírica, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação da umidade do produto seco, é apresentada na Equação 4.15. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,8413. Assim como para as regressões apresentadas na sequência, na análise estatística para as demais respostas, os resíduos foram distribuídos de forma independente e aleatória de acordo com uma distribuição normal com média zero e variância constante. Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno gerados a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.26.

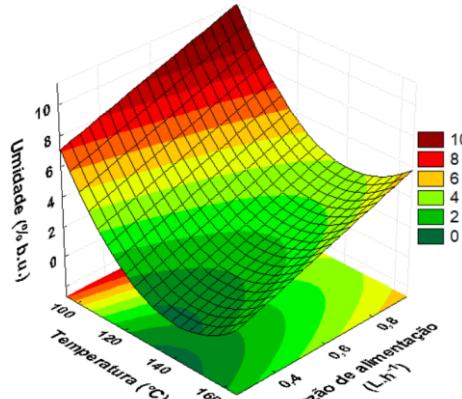
$$Y_{X_{BU}} = 2,21 - 1,59 * X_2 + 1,22 * X_3 + 1,39 * X_2^2 + 1,47 * X_4^2 \quad (4.15)$$

Figura 4.26 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o teor de umidade, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

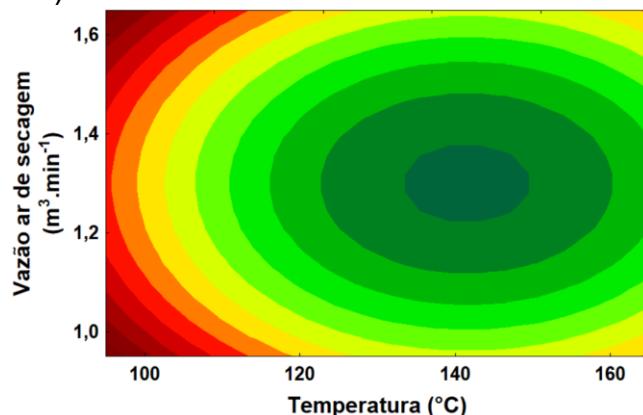
a.1)



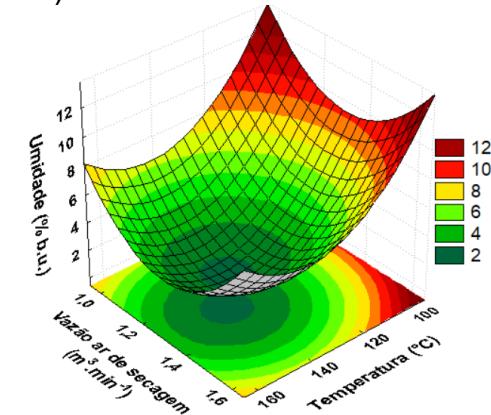
a.2)



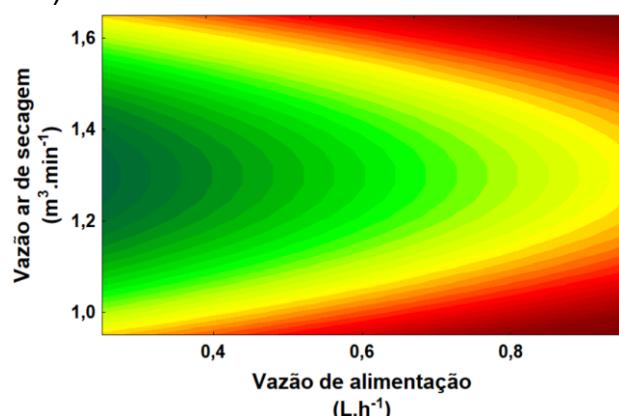
b.1)



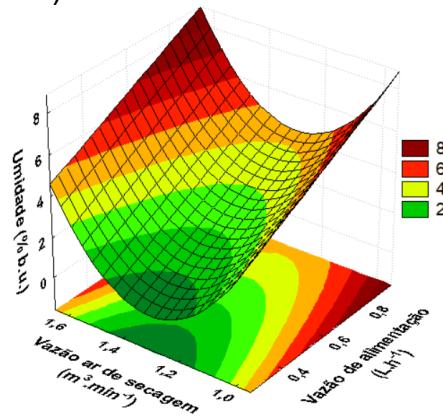
b.2)



c.1)



c.2)



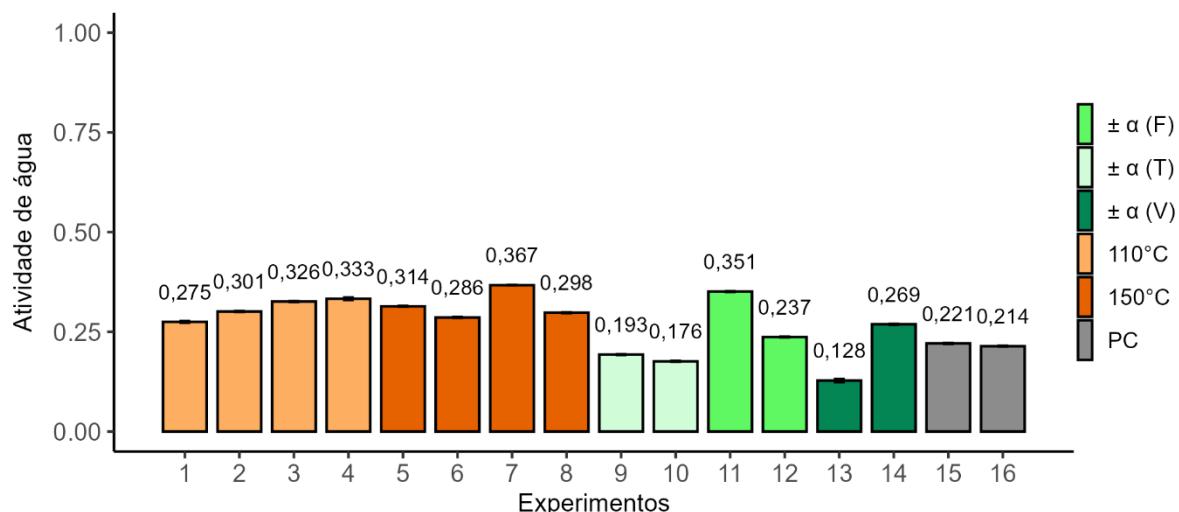
Fonte: dados da pesquisa.

De acordo com a Equação 4.15, os três fatores investigados afetaram de forma significativa no teor de umidade do pó. Esse resultado está em concordância com a análise dos efeitos estimados no planejamento 2⁴. No entanto, com a ampliação do número de níveis no PCCR, foi possível observar a não linearidade do sistema,

evidenciada pelos termos quadráticos significativos e pelas superfícies de resposta. As superfícies indicaram que menores teores de umidade foram obtidos com a combinação de altas temperaturas de secagem (X_2) e baixas vazões de alimentação (X_3). Além disso, observou-se também redução da umidade ao se combinar baixas vazões de alimentação com níveis intermediários de vazão de ar de secagem (X_4). Temperaturas mais elevadas promovem maior taxa de transferência de calor do ar quente para as partículas (gotas), enquanto menores vazões de alimentação reduzem a carga de suspensão sendo atomizada por unidade de tempo, aumentando a razão ar quente/suspensão. Esse conjunto de fatores tende a diminuir o tamanho das gotas e intensificar as taxas de transferência de calor e massa, favorecendo a secagem e resultando em menor umidade residual no pó. A menor umidade final foi associada às vazões intermediárias de ar de secagem, o que pode ser explicado pelo equilíbrio entre o coeficiente convectivo de transferência de calor e o tempo de residência das partículas na câmara. Vazões muito baixas reduzem a intensidade da transferência de calor, enquanto vazões muito elevadas diminuem o tempo de residência, limitando a evaporação. Dessa forma, a condição intermediária favoreceu uma secagem mais eficiente.

A Figura 4.27 apresenta os resultados experimentais de atividade de água dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*.

Figura 4.27 - Atividade de água dos pós de grama de trigo seca por *spray drying*, conforme o PCCR



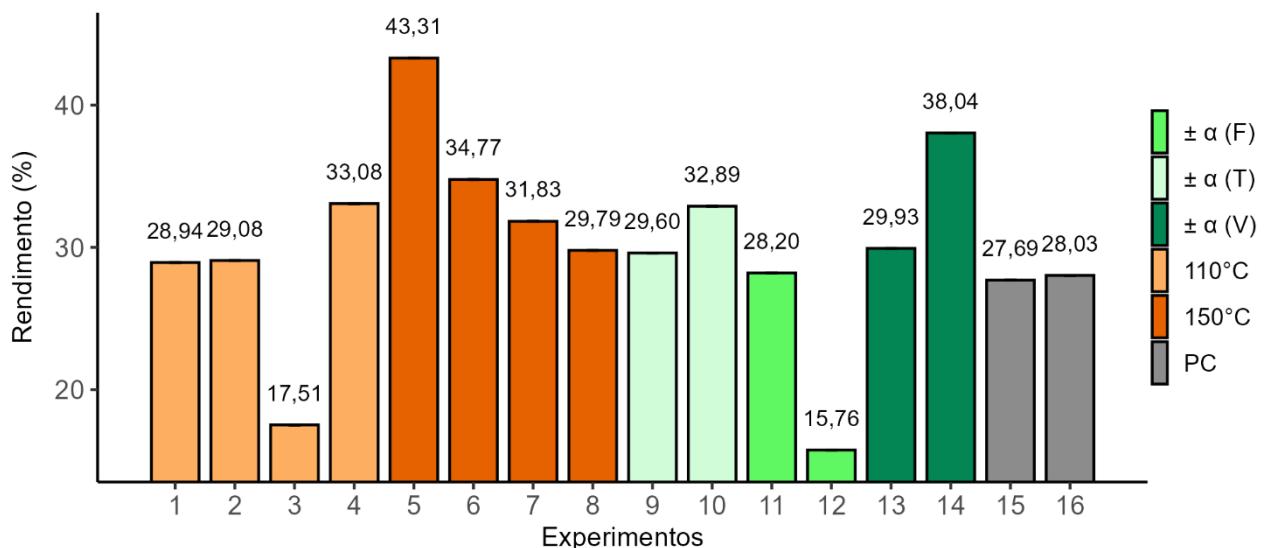
Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

Os valores de atividade de água variaram entre 0,128 (experimento 14, conduzido na condição de maior vazão de ar de secagem – nível axial) e 0,367 (experimento 8, 150°C, 0,8 L·h⁻¹, 1,5 m³·min⁻¹). Todos os valores obtidos estão abaixo de 0,6, limite comumente considerado seguro para inibição do crescimento microbiano em produtos em pó, o que contribui para a estabilidade e conservação do produto ao longo do tempo. No entanto, a análise estatística não indicou efeitos significativos das variáveis independentes sobre a atividade de água, ao nível de significância de 10%, sugerindo que, dentro da faixa avaliada, nenhum dos fatores apresentou influência estatisticamente sobre essa resposta.

4.3.2.2.2 Rendimento

A Figura 4.28 apresenta os resultados experimentais de rendimento de obtenção do pó de grama de trigo nas diferentes condições avaliadas, conforme o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.28 - Rendimento de secagem da grama de trigo por *spray drying*, conforme o PCCR



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

A Figura 4.28 apresenta os rendimentos de secagem obtidos para os pós de grama de trigo nas diferentes condições experimentais avaliadas no PCCR. Observa-se que o rendimento variou amplamente entre os experimentos, com valores de aproximadamente 15,8% a 43,3%, evidenciando a influência dos fatores estudados. O maior valor de rendimento foi obtido no experimento 5, nível superior temperatura

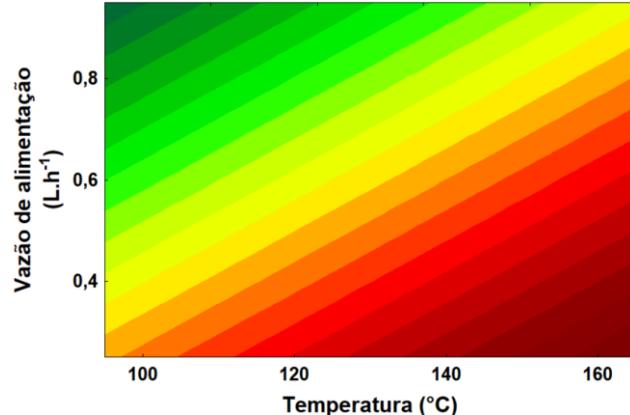
(150°C), nível inferior de vazão de alimentação (0,40 L·h⁻¹) e nível inferior de vazão do ar de secagem (1,1 m³·min⁻¹). Destaca-se também o experimento 14, com rendimento de 38,0%, conduzido na condição extrema de vazão de alimentação (+α = 0,94 L·h⁻¹) e níveis intermediários de temperatura (130°C) e de vazão de ar de secagem (1,3 m³·min⁻¹). Em contraste, o menor rendimento (15,8%) foi registrado na amostra processada sob temperatura extrema inferior (-α = 96°C), com condições intermediárias de vazão de alimentação (0,60 L·h⁻¹) e de vazão de ar de secagem (1,3 m³·min⁻¹).

A equação de regressão múltipla, com os coeficientes significativos (considerando um p < 0,10), obtida para representar a variação do rendimento em função das variáveis independentes avaliadas é apresentada na Equação 4.16. O coeficiente de determinação (R^2) para esse modelo foi de 0,9065. As superfícies de resposta e as curvas de contorno gerados são apresentados na Figura 4.29.

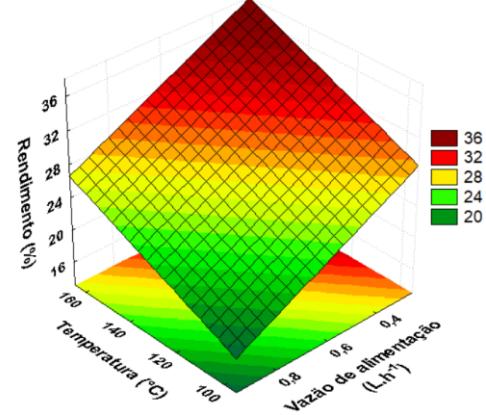
$$Y_R = 27,68 + 2,68 * X_2 - 3,28 * X_3 + 2,61 * X_4^2 - 3,29 * X_2 * X_4 + 2,74 * X_4 * X_3 \quad (4.16)$$

Figura 4.29 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o rendimento, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

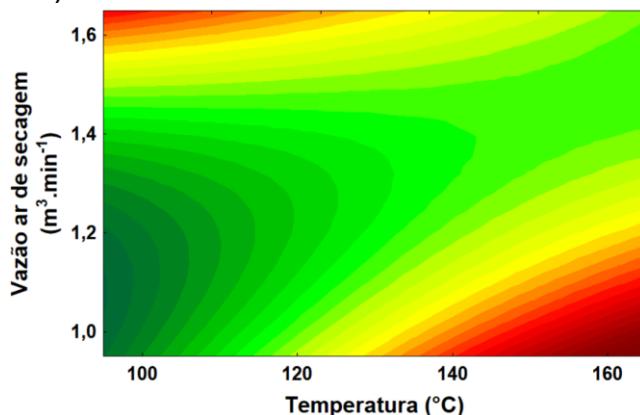
a.1)



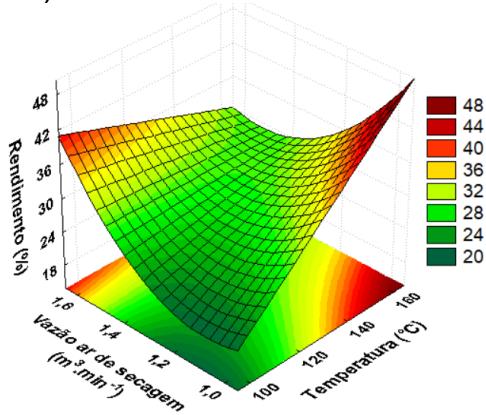
a.2)



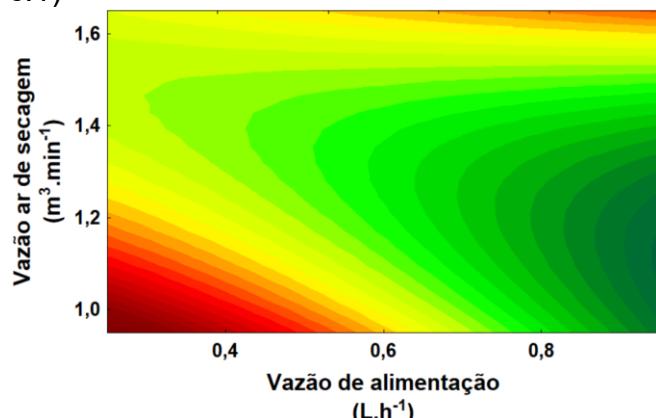
b.1)



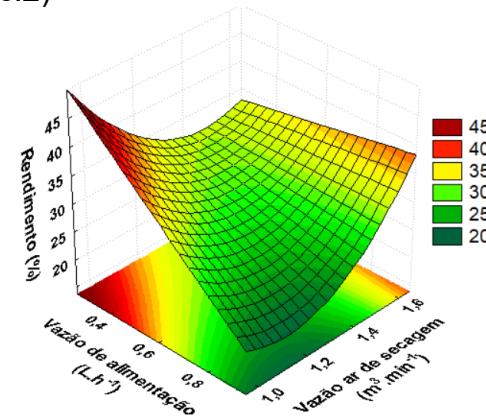
b.2)



c.1)



c.2)



Fonte: dados da pesquisa.

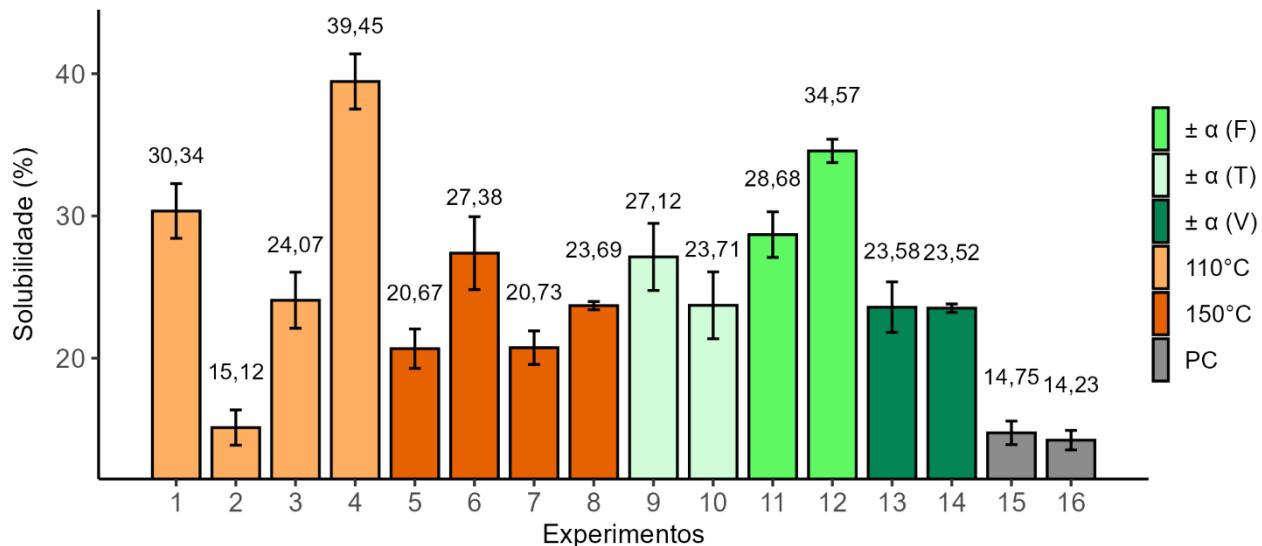
De acordo com a Equação 4.16, em concordância com a análise dos efeitos estimados no planejamento 2⁴, as três variáveis independentes influenciaram significativamente no rendimento de obtenção do pó de grama de trigo. No entanto, com a ampliação do número de níveis no PCCR, foi possível observar não linearidade

do sistema, evidenciada por termos quadrático significativo. As superfícies indicaram, por exemplo, que o rendimento tendeu a ser maior, associando níveis mais elevados de temperatura (X_2) com baixas vazões de alimentação (X_3). Além disso, também se observa que a combinação de temperatura e vazão de ar de secagem (X_4) mais baixas conduziram à menores rendimentos. A elevação da temperatura do ar intensifica o gradiente térmico entre o ar e as gotas atomizadas, aumentando a taxa de evaporação da água e promovendo a formação mais rápida de partículas secas. Isso reduz o risco de que material parcialmente seco seja arrastado pelo fluxo de ar ou adira às paredes da câmara (Quek et al., 2007). Além disso, menores vazões de alimentação reduzem a carga líquida introduzida na câmara de secagem por unidade de tempo, evitando sobrecarga e permitindo melhor aproveitamento da energia térmica disponível para a evaporação da água. Nessas condições, as gotículas apresentam maior probabilidade de secar completamente antes de atingirem as paredes da câmara ou serem arrastadas para o overflow do ciclone com o fluxo de ar. A menor geração de vapor na câmara também reduz a saturação local, o que favorece a transferência de massa e aumenta a eficiência de secagem, contribuindo para maiores rendimentos. Por outro lado, vazões de ar de secagem mais baixas reduzem a capacidade do sistema de remover umidade das partículas. Quando combinadas com temperaturas igualmente baixas, há limitação na transferência de calor e na secagem das gotas atomizadas, o que resulta em menor rendimento final.

4.3.2.2.3 Solubilidade

A Figura 4.30 apresenta os resultados experimentais de solubilidade dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*.

Figura 4.30 - Solubilidade dos pós de grama seca por *spray drying* conforme PCCR



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

Observou-se a partir da Figura 4.30 que os valores de solubilidade variaram entre as diferentes condições avaliadas de 14,23% a 39,45%. O maior resultado foi obtido no experimento 4 realizado nas condições de menor temperatura (110 °C), maior vazão de alimentação (0,80 L·h⁻¹) e maior vazão do ar de secagem (1,50 m³·min⁻¹). Já o menor valor foi registrado no experimento 15, realizados nas condições centrais do planejamento, (130 °C; 0,60 L·h⁻¹; 1,30 m³·min⁻¹) com solubilidade de 14,23%.

A equação empírica, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a solubilidade do produto seco, é apresentada na Equação 4.17 ($R^2 = 0,8743$). O experimento 3 (da matriz do planejamento PCCR) foi identificado como outlier e excluído da regressão. Após sua remoção, os resíduos atenderam aos pressupostos do modelo, com distribuição normal, média zero e variância constante.

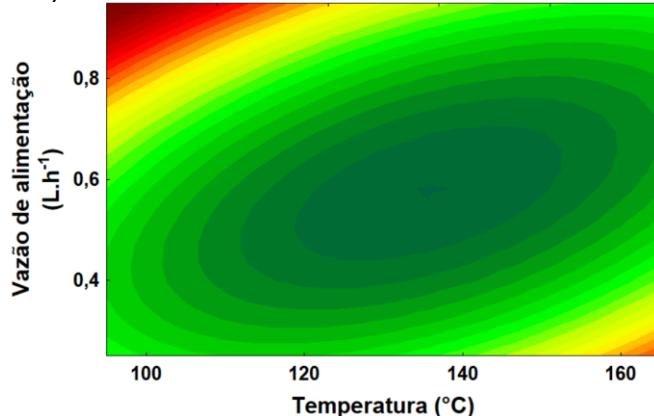
$$Y_{SOL} = 14,53 - 2,81 * X_2 + 2,96 * X_3 + 3,77 * X_2^2 + 5,96 * X_3^2 + 3,10 * X_4^2 - 4,72 * X_2 * X_3 \quad (4.17)$$

De acordo com a Equação 4.17, os três fatores avaliados influenciaram significativamente a solubilidade dos pós de grama de trigo. No planejamento 2⁴, somente as variáveis de tratamento térmico (X_1) e temperatura (X_2) foram

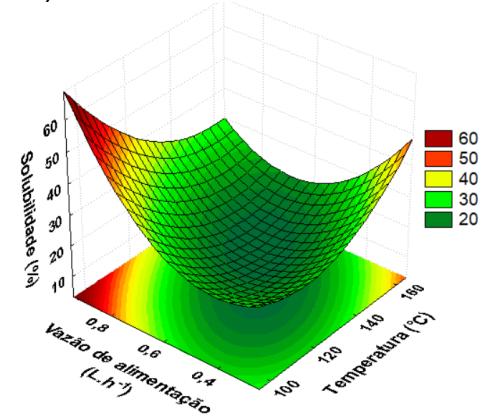
significativas, com a evolução do planejamento para o PCCR, as variáveis de vazão de alimentação (X_3) e vazão do ar de secagem (X_4) também se mostraram significativas, especialmente por meio de efeitos quadráticos e de interação. Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno gerados a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.31.

Figura 4.31 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para a solubilidade, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

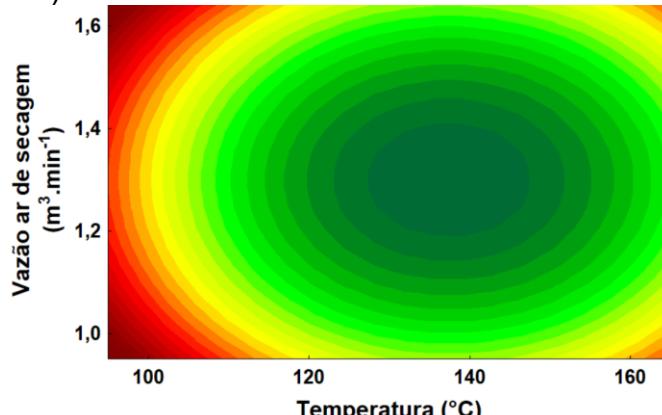
a.1)



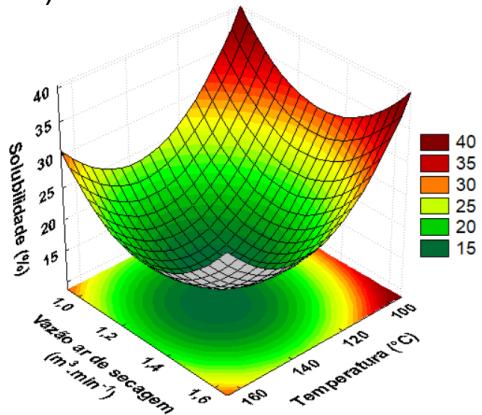
a.2)



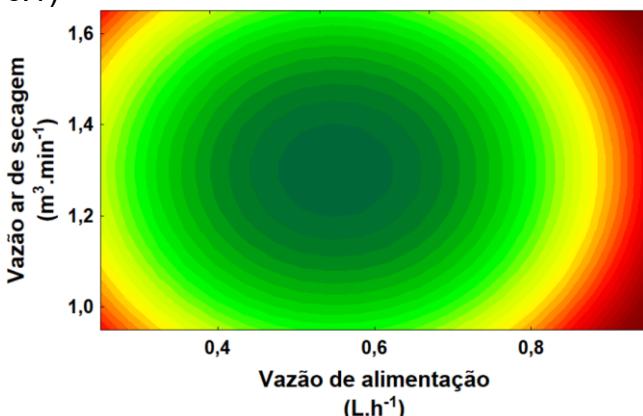
b.1)



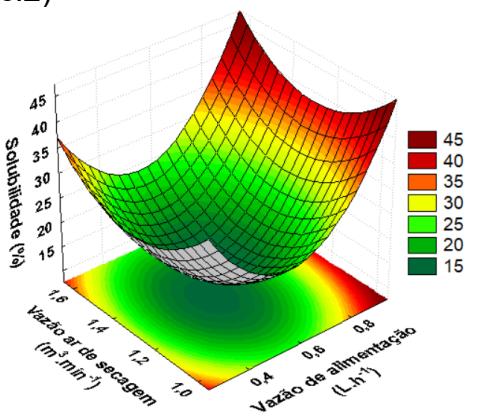
b.2)



c.1)



c.2)



Fonte: dados da pesquisa

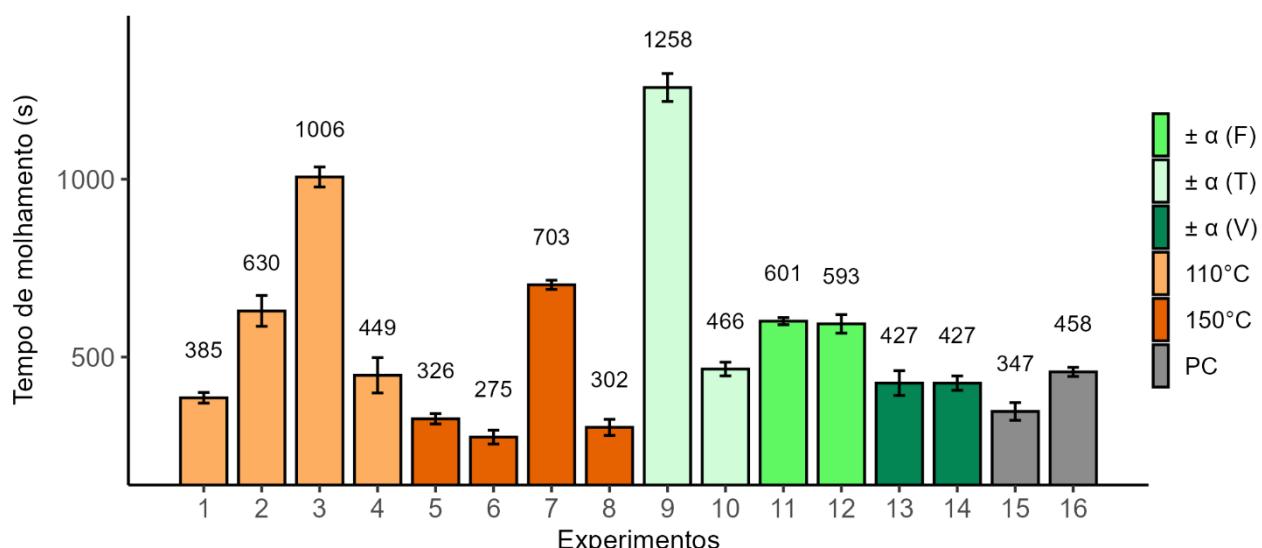
As superfícies indicaram que os maiores valores de solubilidade foram obtidos com a combinação de altas vazões de alimentação (X_3) e baixas temperaturas de secagem (X_2) (Figuras 4.31a), enquanto os menores valores ocorreram em faixas intermediárias das variáveis avaliadas. Vazões elevadas favorecem a formação de

gotas maiores, o que exerce um efeito protetor sobre os constituintes da suspensão, reduzindo sua exposição direta ao calor e preservando compostos hidrossolúveis na matriz (George *et al.*, 2023). Ainda foi observado nas Figuras uma redução da solubilidade em condições intermediárias das variáveis, possivelmente devido à degradação de constituintes sensíveis causada pelo aumento da temperatura, associado a vazões de alimentação em níveis baixos-intermediários. Nessa condição, o aumento da superfície exposta em vazões intermediárias, associadas ao aumento da temperatura favorece a degradação térmica e a oxidação dos constituintes da grama de trigo, resultando na formação de estruturas complexas e insolúveis. Em relação à vazão do ar de secagem (X_4), observa-se que a solubilidade foi maior nos níveis extremos da variável, ou seja, tanto em baixas quanto em altas vazões (Figuras 4.31b). Esse comportamento é coerente com o fato de o único efeito significativo associado a essa variável ser o termo quadrático positivo, indicando uma tendência de comportamento em forma de "U".

4.3.2.2.4 Tempo de Molhamento

A Figura 4.32 apresenta os resultados experimentais de tempo de molhamento dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, conforme o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.32 - Tempo de molhamento dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme PCCR



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

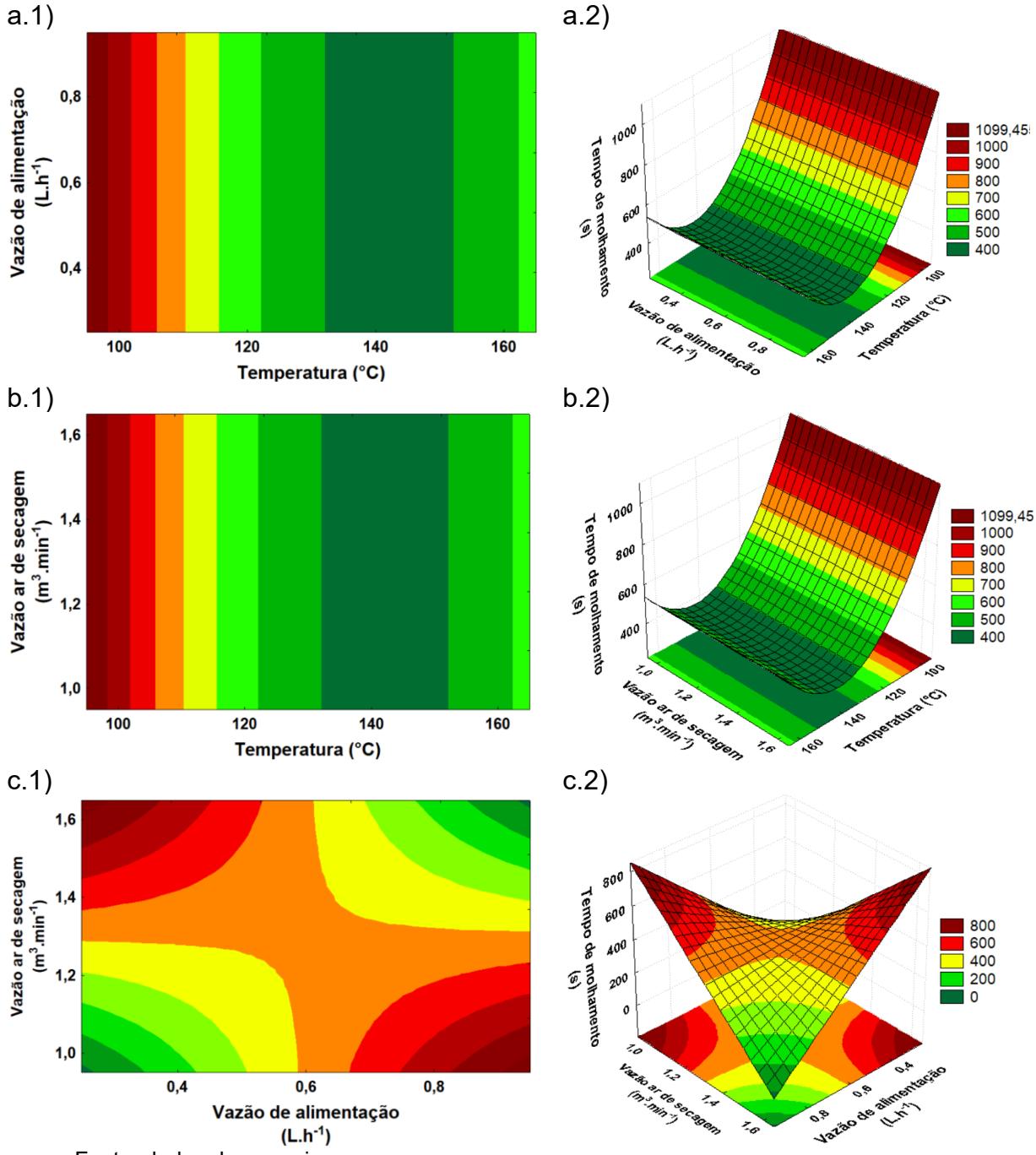
A partir da Figura 4.32 foi observado que os tempos de molhamento variaram entre 274 segundos (4 min e 34 s) no experimento 6, realizado na condição de nível superior de temperatura e vazão e ar de secagem e nível inferior de vazão de alimentação (150°C , $1,5 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $0,4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) e 1227 segundos (20 min e 27 s) no experimento 9, realizado na condição ponto axial de menor temperatura ($96,36^{\circ}\text{C}$). De modo geral a interação das partículas com a água não aconteceu de modo instantâneo.

A equação empírica, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação do tempo de molhamento, é apresentada na Equação 4.18. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,8002.

$$Y_{TM} = 415,35 - 160,71 * X_2 + 131,54 * X_2^2 - 143,89 * X_4 * X_3 \quad (4.18)$$

De acordo com a Equação 4.18, os três fatores investigados influenciaram de forma significativa o tempo de molhamento das partículas, sendo a temperatura influente de forma linear e quadrática, a vazão de alimentação e a vazão do ar de secagem foram significativas apenas por meio de interação. Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno gerados a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para tempo de molhamento, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).



Fonte: dados da pesquisa.

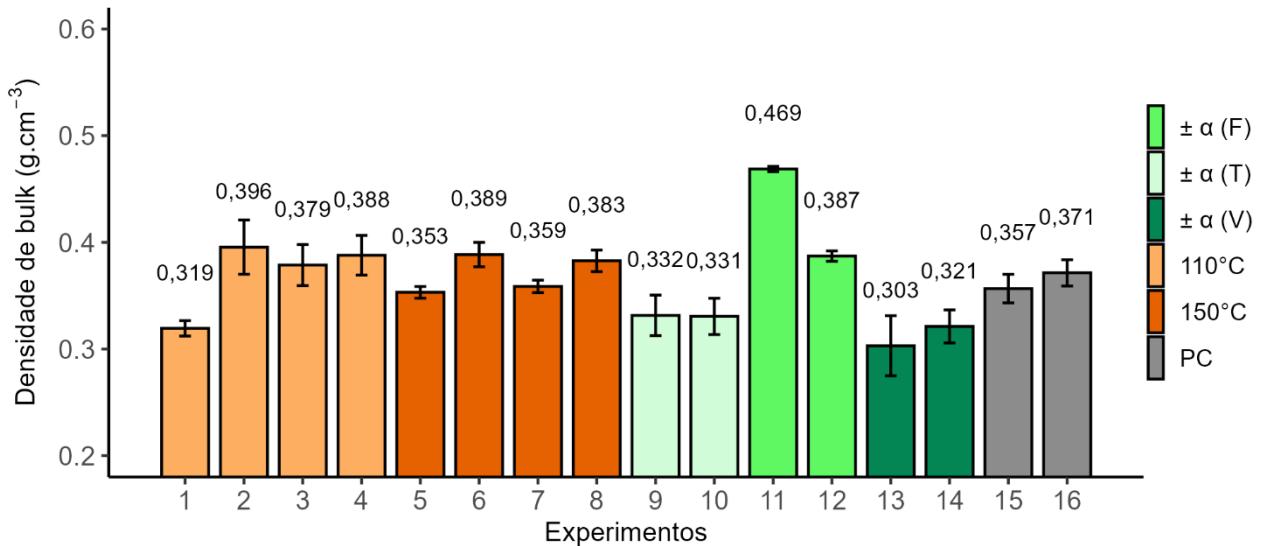
As superfícies de resposta indicaram que os menores tempos de molhamento foram obtidos nas condições de maiores temperaturas de secagem (X_2), independentemente das demais variáveis avaliadas (Figuras a e b). Em contrapartida, os maiores tempos foram observados em baixas temperaturas. O aumento da

temperatura de secagem aumenta a taxa de evaporação da água, o que pode levar à formação de partículas oca. Isso ocorre porque a camada externa da gota se solidifica rapidamente, retendo líquido no interior; à medida que o líquido continua evaporando, forma-se uma pressão interna que infla a partícula, criando uma estrutura oca. Essas partículas podem apresentar maior fragilidade e, em alguns casos, maior permeabilidade à água, favorecendo o molhamento (Dantas *et al.*, 2023; Pui; Saleena, 2022). Foi observado, na interação entre vazão de alimentação (X_3) e vazão de ar de secagem (X_4) (Figuras c), que os maiores tempos de molhamento ocorreram quando essas variáveis estavam em condições contrárias, como alta vazão de ar com baixa alimentação e vice-versa. Em altas vazões de ar com baixa alimentação, a rápida evaporação pode formar uma crosta superficial rígida dificultando o molhamento. Já em condições de alta alimentação e baixa vazão de ar, formam-se partículas maiores e com umidade residual devido à secagem incompleta, que tendem a apresentar estrutura menos porosa, o que dificulta a penetração da água e aumenta o tempo de molhamento (Burgain *et al.*, 2017; George *et al.*, 2023). Ainda o elevado tempo de molhamento observado, em geral, pode ser justificado pela composição de constituintes como pigmentos insolúveis como clorofila e carotenoides e derivados de degradação térmica da estrutura durante a secagem (Cai *et al.*, 2021; George *et al.*, 2023; Juarez-Enriquez *et al.*, 2017).

4.3.2.2.5 Densidade de bulk

A Figura 4.34 apresenta os resultados experimentais de densidade de bulk dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, conforme o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.34 - Densidade de bulk dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme PCCR



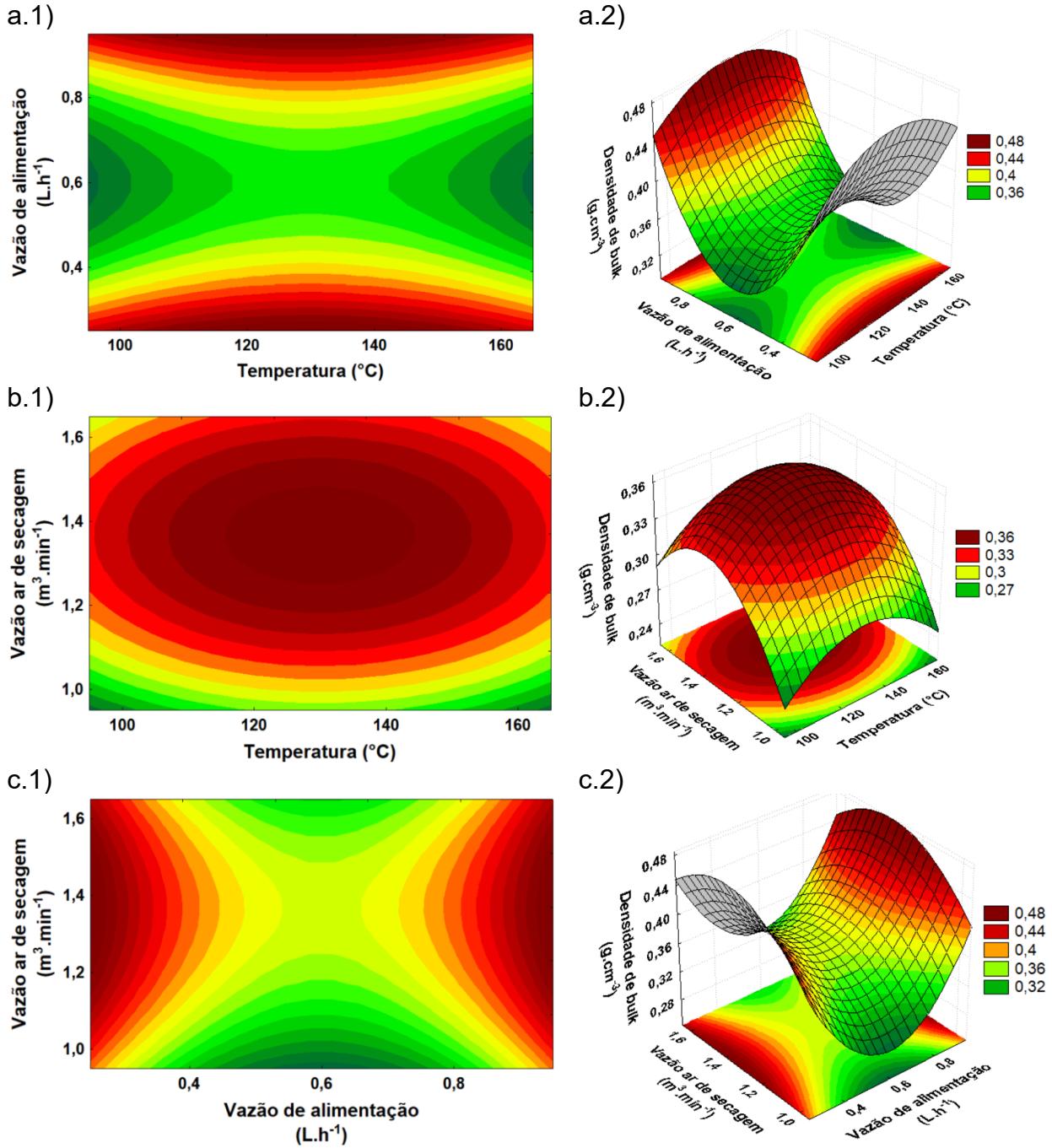
Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

A densidade de bulk dos pós obtidos variou entre 0,303 e 0,469 g·cm⁻³, conforme apresentado na Figura 4.34. O menor valor foi observado no experimento 13, correspondente a uma condição axial de menor vazão de ar de secagem, enquanto o maior valor foi registrado no experimento 11, sob ponto axial de menor vazão de alimentação. A equação empírica, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação do tempo de molhamento, é apresentada na Equação 4.19. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,9546.

$$Y_{DB} = 0,3644 + 0,0128 * X_4 - 0,0124 * X_2^2 + 0,0390 * X_3^2 - 0,0191 * X_4^2 \quad (4.19)$$

Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno gerados a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.35.

Figura 4.35 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para densidade de bulk, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).



Fonte: dados da pesquisa.

Como indicado pela Equação 4.19 e observado na Figura 4.35 as superfícies resposta e as curvas de contorno apresentaram influência dos efeitos quadráticos. As superfícies de resposta indicaram que os maiores valores de densidade de bulk foram obtidos em condições extremas para a vazão de alimentação (X_3) (Figuras 4.35a e

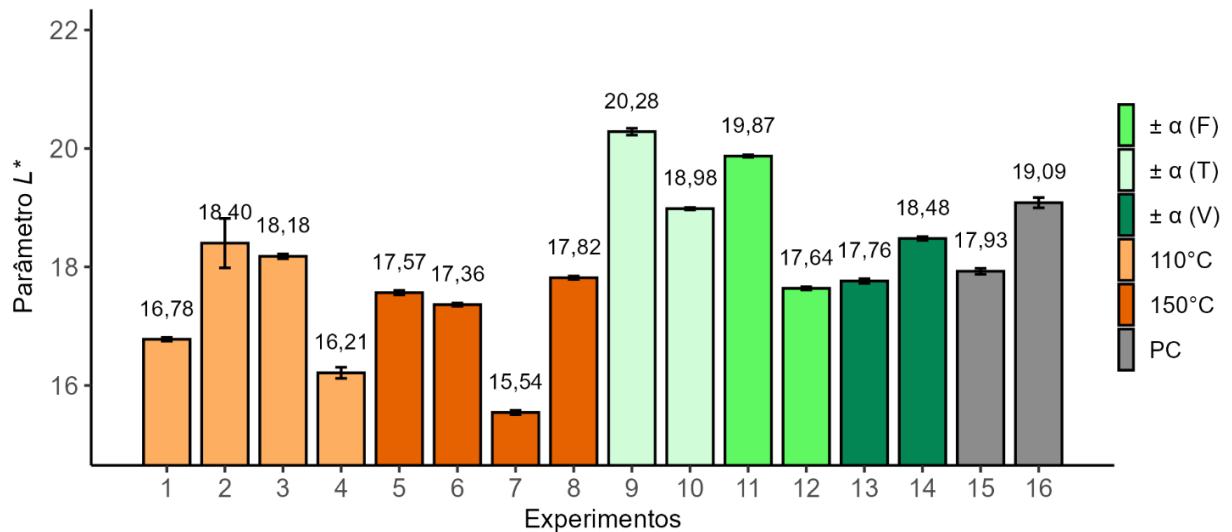
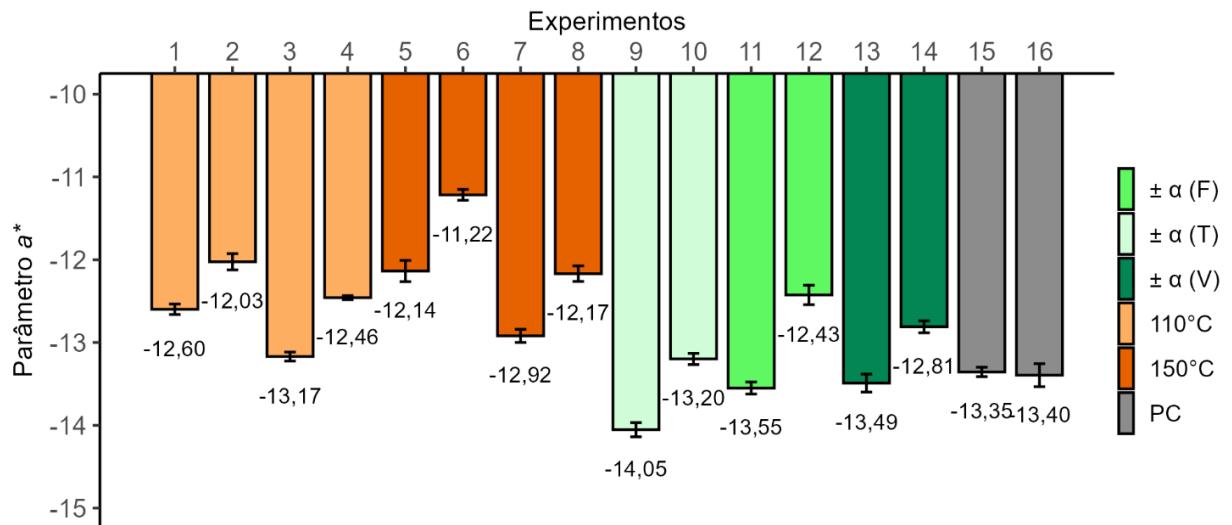
4,36b). Maiores e menores vazões de alimentação, favorecem a formação de partículas mais compactas, promovendo aumento da densidade de bulk (George et al., 2023). Em condições intermediárias, podem ser geradas partículas parcialmente secas, com estrutura interna colapsada ou superfície irregular, dificultando o empacotamento. Assim como o efeito da vazão de alimentação, a densidade de bulk variou de forma não linear com a temperatura (X_2), apresentando valores ligeiramente mais elevados nas faixas intermediárias de temperatura, enquanto valores um pouco menores foram observados nas temperaturas mais baixas e mais altas. Esse comportamento sugere que temperaturas intermediárias favorecem uma compactação um pouco maior do material, ao passo que condições extremas podem gerar estruturas menos densas. Para temperaturas mais baixas e mais altas, é possível que a formação de partículas ocorra com morfologia menos favorável ao empacotamento, resultando em maior espaçamento entre partículas e, consequentemente, menor densidade aparente (George et al., 2023). Por outro lado, as extremidades das variáveis, ainda foi observado que a densidade de bulk foi maior nas regiões de baixas vazões de alimentação associadas a vazões de ar de secagem intermediárias (X_4) (Figuras 4.35c). Nessas condições, a menor entrada de material favorece a formação de partículas mais densas, enquanto faixas intermediárias parecem induzir à formação de estruturas porosas e menos organizadas, reduzindo a densidade aparente do pó final. (George et al., 2023).

4.3.2.2.6 Cor

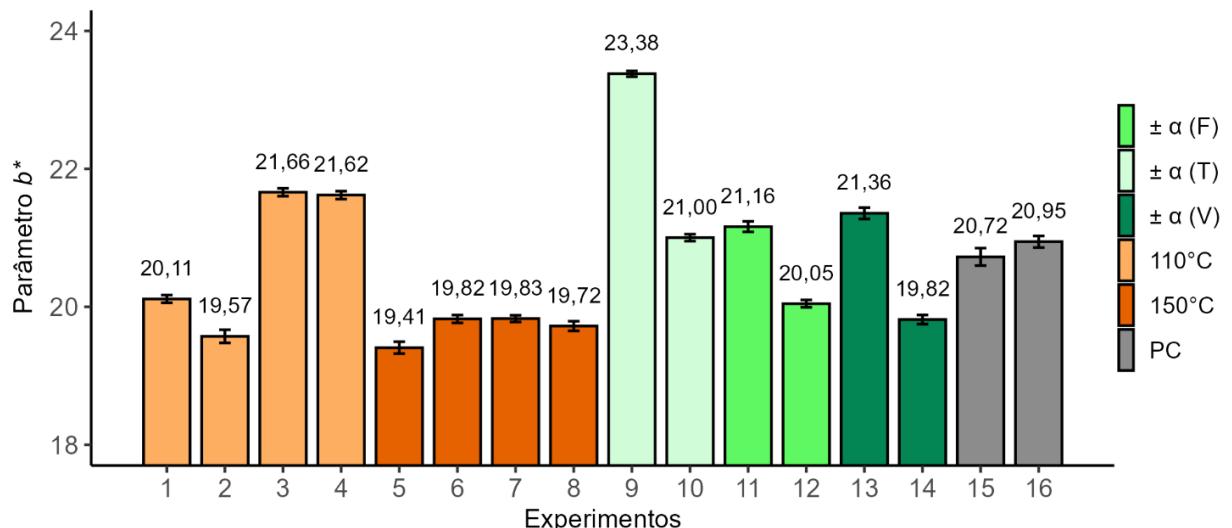
A Figura 4.36 apresenta os resultados experimentais dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, conforme o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.36 - Resultados dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme PCCR

a) Parâmetro L^*

b) Parâmetro a^* 

c) Parâmetro b*



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

Como mostrado na Figura 4.36a os valores de L^* variaram de 15,5 a 20,3, indicando diferença na luminosidade final dos pós. Os valores de a^* variaram de -14,09 a -11,20, indicando predominância da tonalidade verde (Figura 4.36b). Os valores de b^* variaram entre 19,4 e 23,4, indicando presença de amarelo nos pós (Figura 4.36c).

As equações empíricas, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação da cor instrumental do produto seco, são apresentadas nas Equação 4.20 a 4.22 respectivamente para os parâmetros L^* , a^* , b^* .

$$Y_{L^*} = 18,58 - 0,95 * X_3 + 1,16 * X_2 * X_4 \quad (4.20)$$

$$Y_{a^*} = -13,41 + 0,24 * X_2 - 0,43 * X_3 + 0,30 * X_4 + 0,76 * X_3^2 \quad (4.21)$$

$$Y_{b^*} = 20,87 - 0,60 * X_2 + 0,57 * X_3 + 0,40 * X_2^2 - 0,76 * X_3^2 - 0,41 * X_2 * X_3 \quad (4.22)$$

Na análise estatística dos resultados do planejamento composto central, ao realizar a regressão múltipla para ajuste do modelo e estimativa dos efeitos das variáveis independentes, a análise residual identificou o experimento 1 (da matriz do PCCR) como um *outlier* em relação ao valor observado para o parâmetro L^* , motivo pelo qual foi excluído da regressão. Para os parâmetros a^* e b^* , o experimento 11 foi retirado pelo mesmo critério. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram de 0,8316 para L^* , 0,9004 para a^* e 0,9195 para b^* . Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno geradas a partir das equações de regressão são apresentadas nas Figura 4.37 a 4.39.

As equações de regressão, visualizadas pelas superfícies de resposta e curvas de contorno, indicam que os parâmetros de cor foram significativamente influenciados pelas três variáveis do processo de secagem estudadas, exceto para o parâmetro b^* , no qual a vazão de ar de secagem não apresentou efeito significativo. Em geral, as alterações observadas nos parâmetros de cor indicam que as condições de secagem influenciam tanto a preservação de pigmentos como clorofitas e carotenoides quanto

a ocorrência de reações de degradação que impactam negativamente a coloração final do pó.

Para L^* , foi observado na Equação 4.20 e na Figura 4.37 que esse parâmetro de cor foi influenciado pela vazão de alimentação (X_3), por meio do termo linear, e pela temperatura (X_2) e vazão de ar de secagem (X_4), mas apenas por meio da interação entre essas duas variáveis. Pelo sinal negativo do coeficiente relacionado à vazão de alimentação, verifica-se que os pós mais claros (valores elevados de luminosidade) foram obtidos em menores vazões de alimentação. Esse comportamento pode estar relacionado à maior razão entre calor fornecido e massa de suspensão atomizada em menores vazões de alimentação, favorecendo secagem mais rápida e uniforme e preservando melhor os pigmentos, o que resulta em maior luminosidade. A interação entre temperatura e vazão de ar de secagem (Figuras 4.37 b), mostra que os valores mais altos de L^* (pós mais claros) ocorreram quando ambas as variáveis estavam simultaneamente nos extremos, isto, nos níveis mais elevadas ou nos níveis mais baixos, o que pode estar relacionado à secagem mais rápida e eficiente, que limita a degradação térmica. Por outro lado, combinações como alta temperatura com baixa vazão de ar ou alta vazão de ar com baixa temperatura resultaram em menor luminosidade, possivelmente devido ao superaquecimento ou à secagem incompleta, que favorecem o escurecimento.

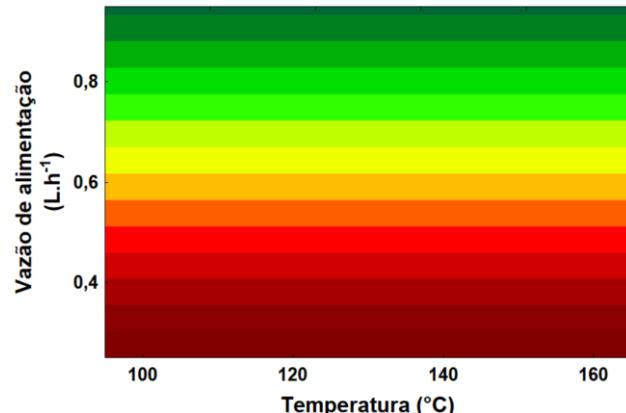
Em relação ao parâmetro a^* , todas as três variáveis influenciaram significativamente essa resposta. Para a variável vazão de alimentação (X_3), considerando também o efeito quadrático positivo, conforme observado na Figura 4.38 verificou-se que os valores de a^* foram menores em condições de vazão de alimentação intermediária a alta, indicando melhor preservação da cor verde (Figura 4.38a e Figura 4.38c). Em baixas e altas vazões de alimentação, os valores de a^* aumentaram, sugerindo degradação dos pigmentos. A degradação em altas vazões de alimentação podem estar associada à formação de um maior número de gotas, muitas delas de menor tamanho, resultando em maior área superficial específica e, consequentemente, maior suscetibilidade à transferência de calor e à oxidação dos pigmentos. Já em baixas vazões de alimentação, a menor quantidade de suspensão atomizada pode favorecer a formação de gotas menores, que secam mais rapidamente e apresentam maior superfície exposta ao oxigênio e ao calor, intensificando a degradação da tonalidade verde. Os menores valores de a^* , indicando

maior preservação da cor verde, foram observados na condição simultânea de menores temperaturas (X_2) e menores velocidades de ar de secagem (X_4), provavelmente devido à menor taxa de transferência de calor e evaporação, reduzindo a degradação térmica e oxidativa dos pigmentos. Nas condições combinadas de alta temperatura e alta vazão de ar de secagem (Figura 4.38b), os valores de a^* também aumentaram, indicando redução na tonalidade verde, o que pode ser atribuído à maior taxa de transferência de calor e evaporação, acelerando a degradação térmica e oxidativa dos pigmentos.

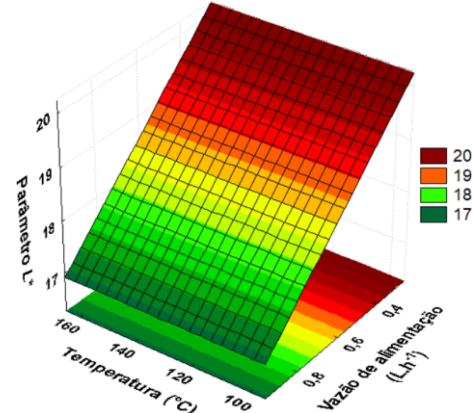
Já no que diz respeito ao parâmetro b^* , nota-se que maiores valores foram encontrados na condição simultânea de maiores vazões de alimentação e baixas temperaturas, indicando presença de tons mais amareladas (Figuras 4.39).

Figura 4.37 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o parâmetro L^* , em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

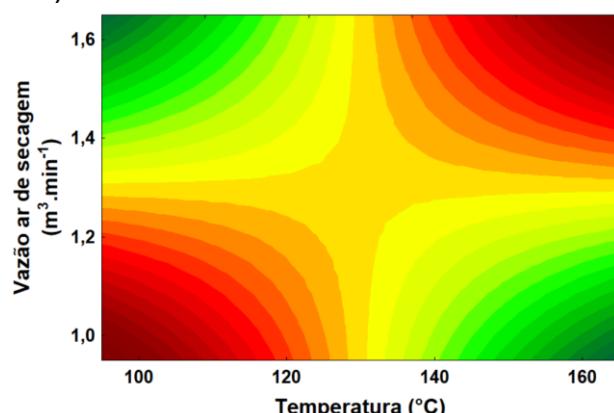
a.1)



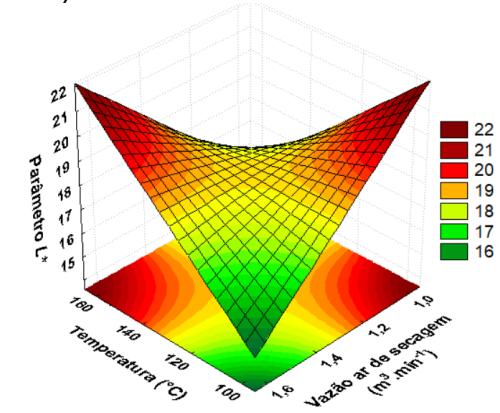
a.2)



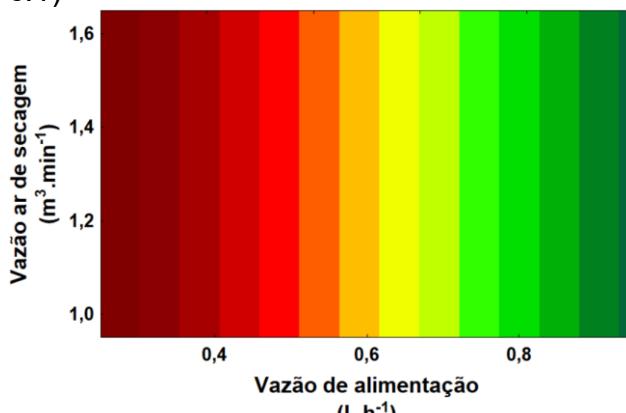
b.1)



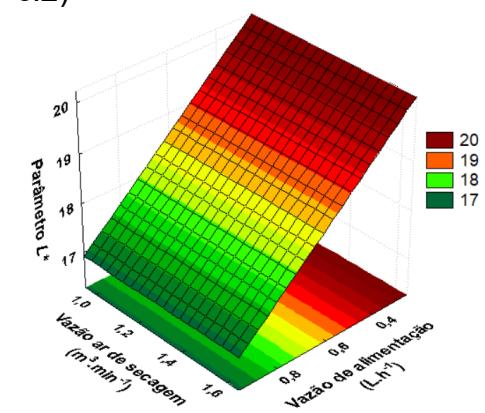
b.2)



c.1)



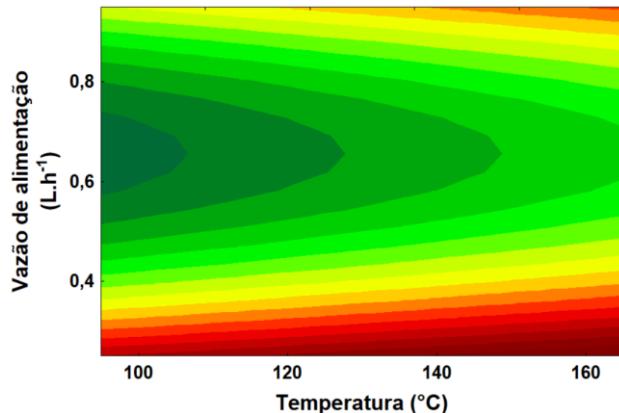
c.2)



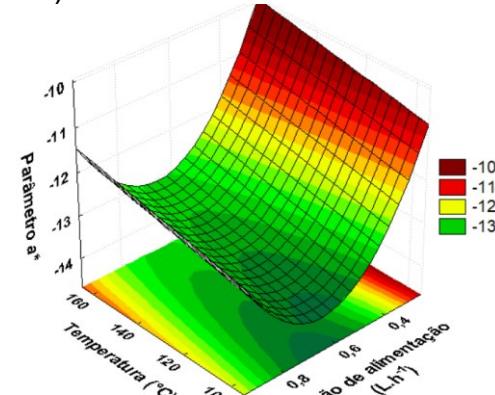
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 4.38 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o parâmetro a^* , em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

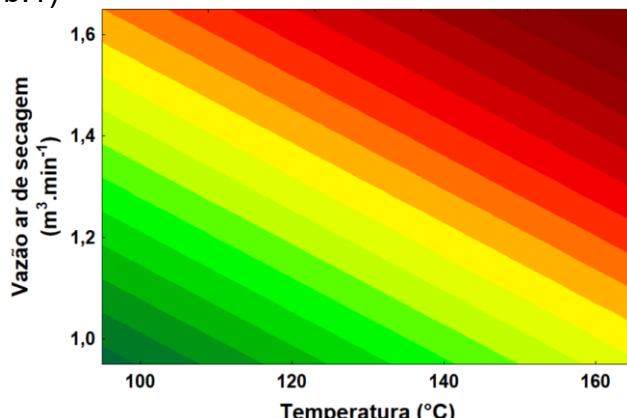
a.1)



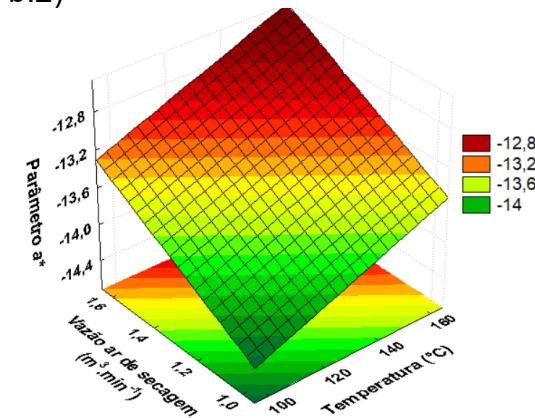
a.2)



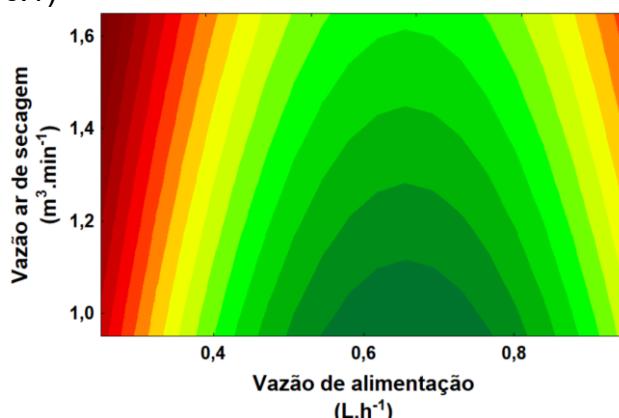
b.1)



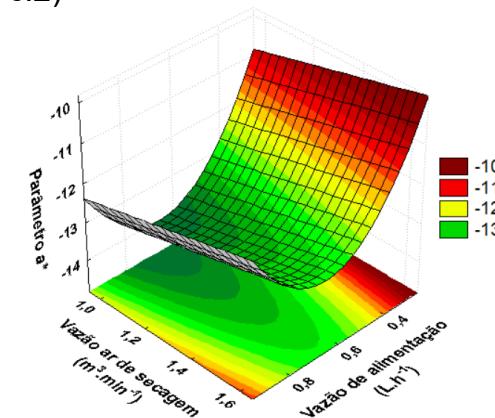
b.2)



c.1)



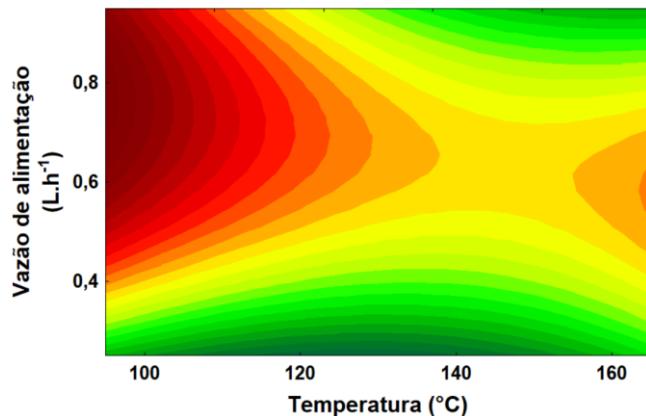
c.2)



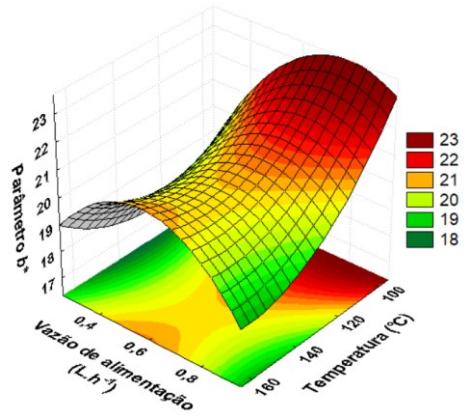
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 4.39 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para o parâmetro b^* , em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

a.1)



a.2)

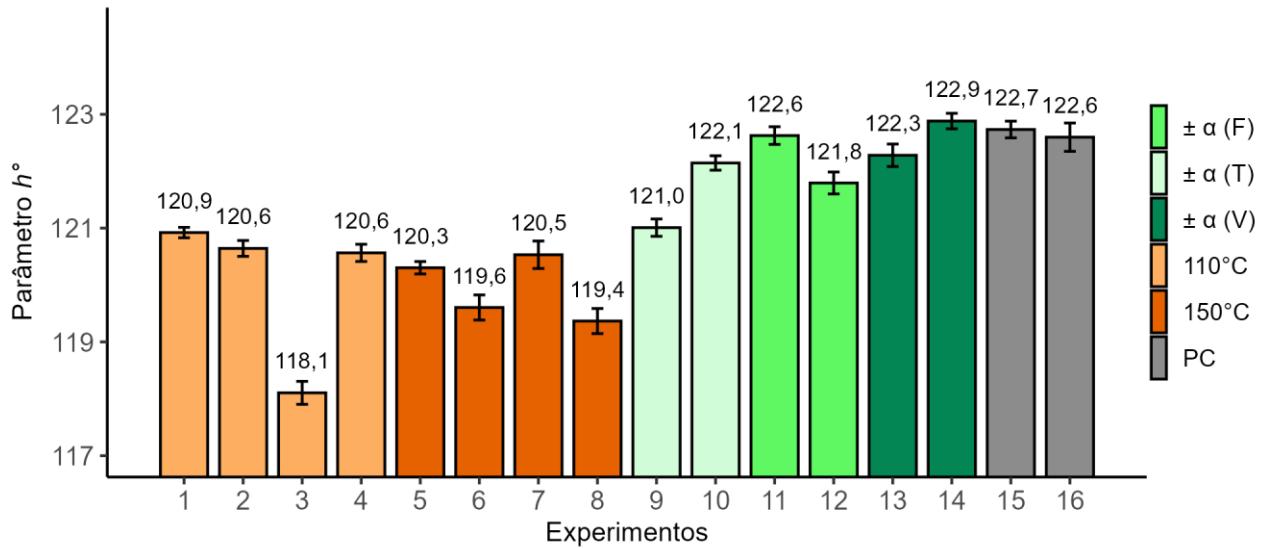


Fonte: dados da pesquisa.

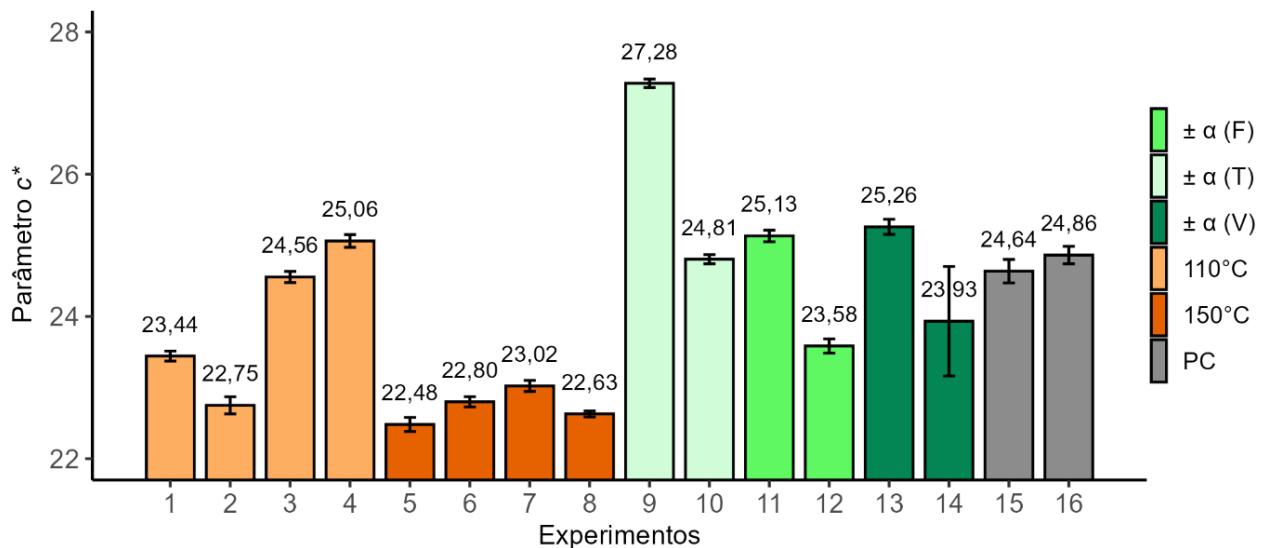
A Figura 4.40 apresenta os resultados dos parâmetros de cor ângulo de tonalidade (h°) e cromaticidade (c^*). O parâmetro h° , (expresso em graus), refere-se à tonalidade da cor, enquanto c^* representa a saturação da cor, indicando se a cor é mais opaca, como acinzentada, ou mais intensa, com tons vibrantes. Os valores de h° (Figura 4.40a) variaram entre 121,06° e 123,71 apóas a secagem em *spray dryer*, enquanto a amostra *in natura* apresentou 127° (Tabela 4.5). Considerando que, nessa escala, 90° corresponde ao amarelo e 180° ao verde, observa-se uma leve redução da tonalidade verde, com deslocamento em direção ao amarelo, embora a coloração geral das amostras permaneça na faixa de verde. Já os valores de c^* (Figura 4.40b) variaram entre 22,48 e 27,31, sugerindo diferenças na saturação da cor, com algumas amostras apresentando colorações mais intensas. Para ambos os parâmetros, o ajuste por regressão apresentou baixo coeficiente de determinação ($R^2 < 0,80$) e nenhum fator com efeito significativo, indicando que o modelo não foi adequado para explicar a variabilidade dos dados, não sendo possível estabelecer relação estatisticamente confiável entre as variáveis do processo e esses parâmetros de cor.

Figura 4.40 - Resultados para h° e c^* dos pós de grama de trigo.

a) Ângulo de tonalidade (h°)

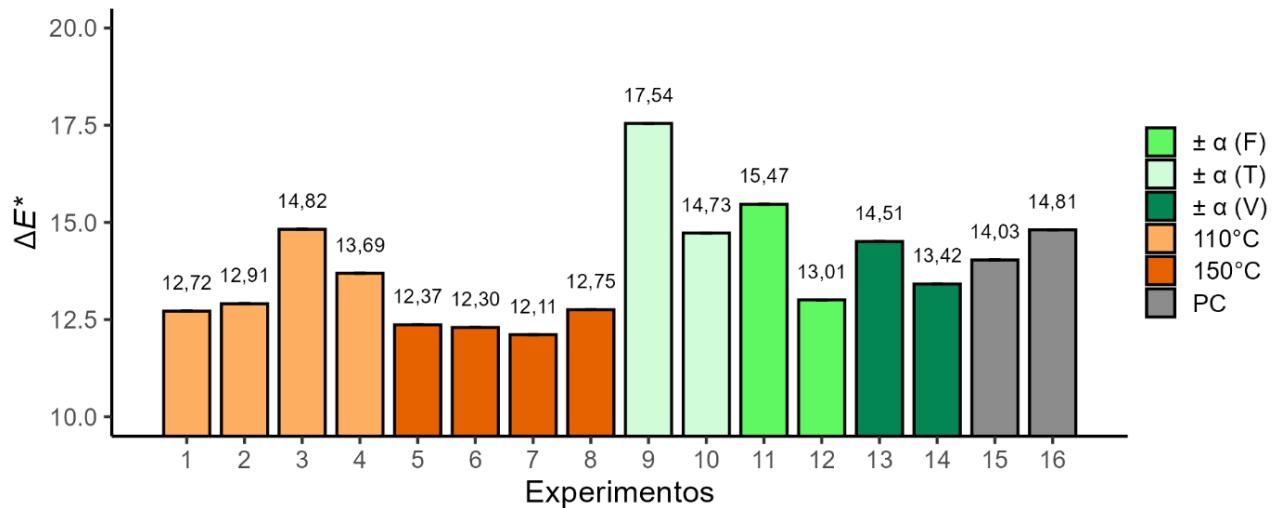


b) Cromaticidade (c^*)



A variação global de cor (ΔE^*) foi obtida comparando-se os parâmetros de cor pós obtidos por *spray drying* com aqueles da amostra *in natura* submetida ao branqueamento, conforme apresentado na Tabela 4.5. Os resultados são mostrados na Figura 4.41.

Figura 4.41 – Variação global de cor (ΔE^*) dos pós de grama de trigo seca por spray drying conforme PCCR



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

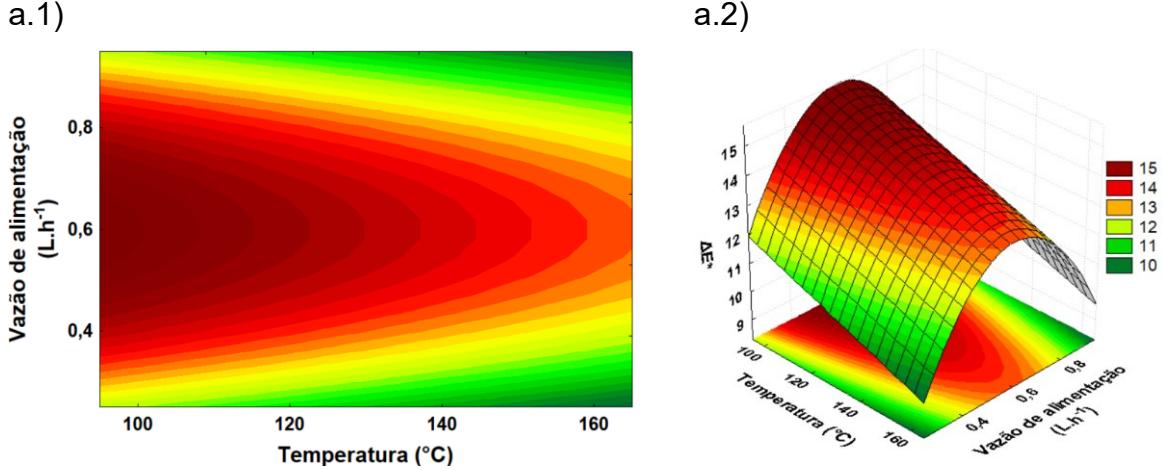
A diferença total de cor (ΔE^*), apresentada na Figura 4.41, quantifica a diferença da cor da grama de trigo em relação à amostra *in natura*, resultante do processo de secagem. Os valores variaram entre 12,11 e 17,54, sendo os menores, em geral, observados em condições de secagem a 150°C (experimentos 5 a 8).

A equação empírica com modelo reduzido (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação global de cor, é apresentada na Equação 4.23. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,8388. Durante a análise residual, o experimento 11 (da matriz do planejamento PCCR) foi identificado como um outlier e, por isso, foi excluído da regressão. Após a exclusão, os resíduos apresentaram comportamento aleatório, sendo independentes e identicamente distribuídos com distribuição normal em torno da média zero e variância constante, atendendo aos pressupostos do modelo de regressão.

$$Y_{\Delta E^*} = 14,51 - 0,68 * X_2 - 1,23 * X_3^2 \quad (4.23)$$

Conforme apresentado na equação 4.23, as variáveis significativas foram a temperatura de secagem (X_2) e vazão de alimentação (X_3), sendo mais pronunciado o efeito o efeito de X_3 , expresso apenas pelo termo quadrático. Para melhor visualização dos efeitos desses fatores na variação global de cor (ΔE^*), a superfície de resposta e a curva de contorno geradas a partir da equação de regressão são apresentadas na Figura 4.42.

Figura 4.42 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para variação global de cor (ΔE^*), em função de temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$))

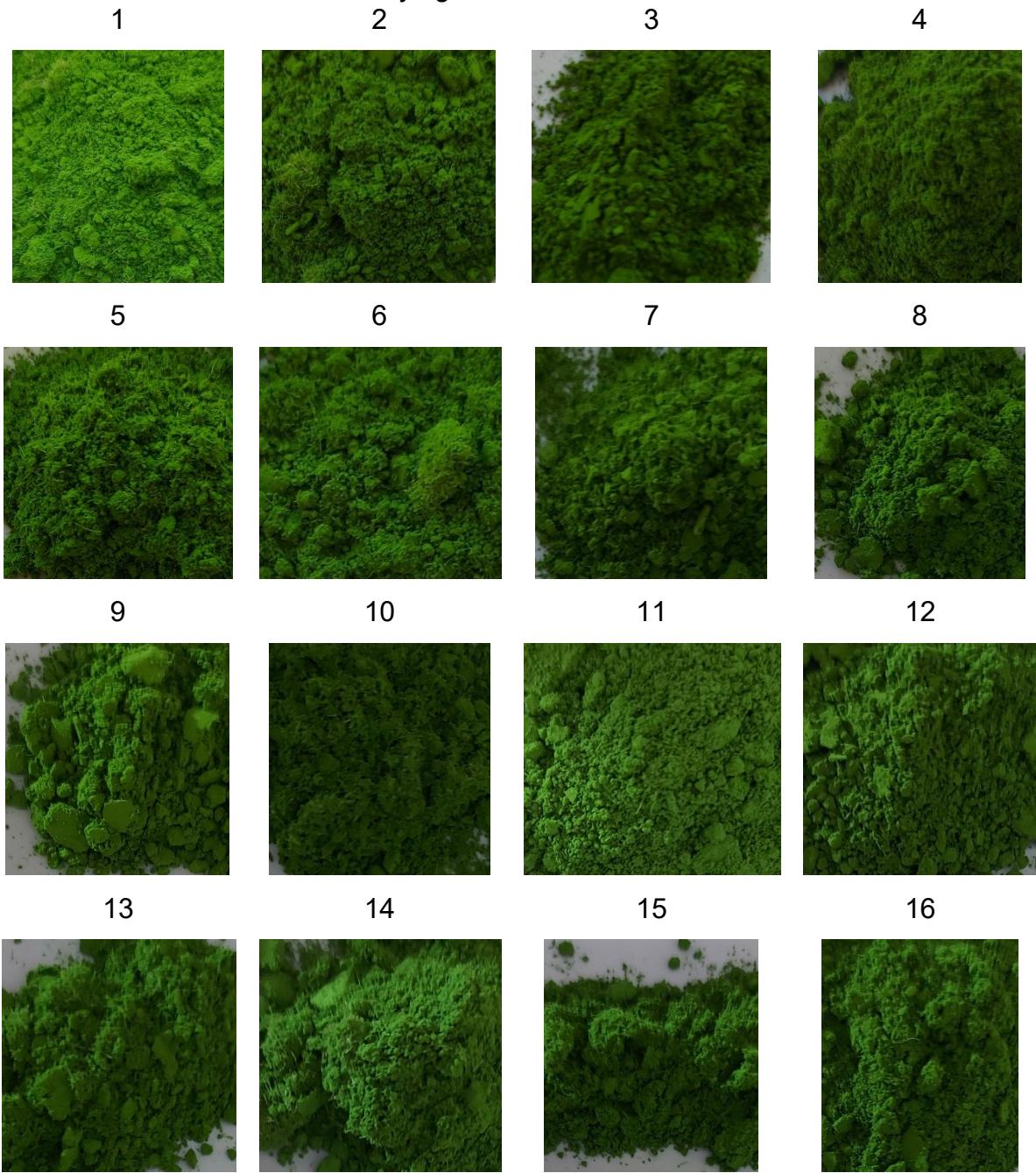


Fonte: dados da pesquisa.

A superfície de resposta e a curva de contorno mostraram que os menores valores de variação global de cor (ΔE^*) foram obtidos com a combinação de temperaturas de secagem (X_2) mais elevadas e vazões de alimentação (X_3) em níveis extremos (alto ou baixo), enquanto os maiores valores de ΔE^* ocorreram em temperaturas mais baixas, especialmente associadas a vazões intermediárias de alimentação (Figura 4.42). Em baixas vazões de alimentação, o menor volume de suspensão atomizada possivelmente tendeu a formar gotas menores, que secaram mais rapidamente, mas ficaram mais expostas ao calor, favorecendo reações de degradação responsáveis pelo escurecimento. Em altas vazões, o maior volume de líquido atomizado por unidade tempo tendeu a formar gotas maiores, o que reduziu o aumento rápido da temperatura nas partículas durante a secagem e contribuiu para a preservação de pigmentos sensíveis. Em níveis intermediários de vazão de alimentação, a secagem não foi suficientemente rápida para evitar reações de degradação, nem suficientemente lenta para proteger os constituintes internos, favorecendo alterações de cor.

Na Figura 4.43 são apresentadas fotografias dos pós de grama de trigo secos conforme os 16 experimentos do PCCR.

Figura 4.43 Fotografia dos pós de grama de trigo obtidos por secagem em *spray drying* conforme PCCR

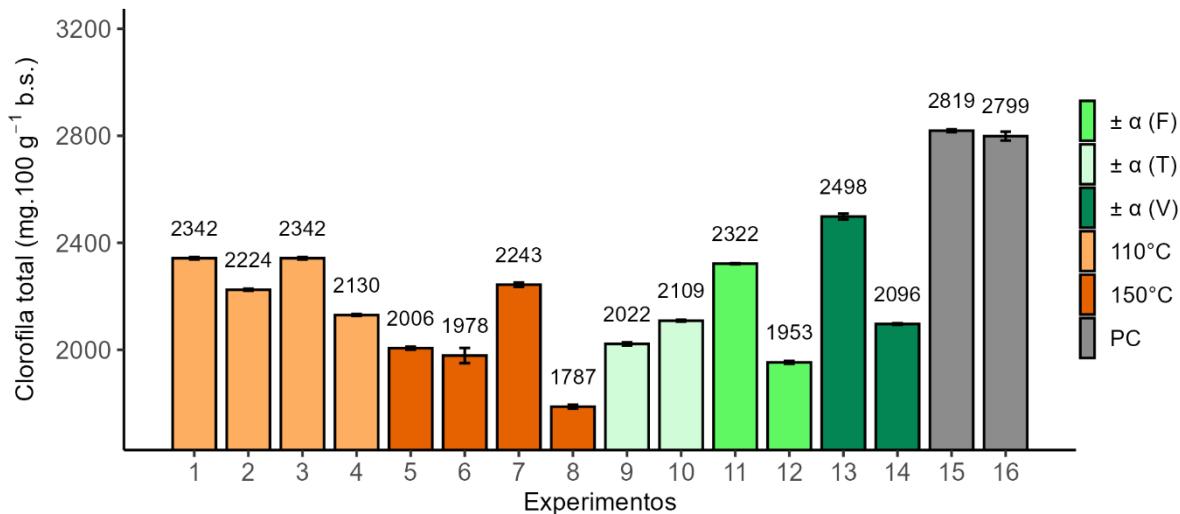


4.3.2.2.7 Compostos bioativos

4.3.2.2.7.1 Clorofila

A Figura 4.44 apresenta os resultados experimentais de clorofila total dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, conforme o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.44 - Resultados de clorofila total dos pós de grama de trigo seca por spray drying conforme PCCR.



Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

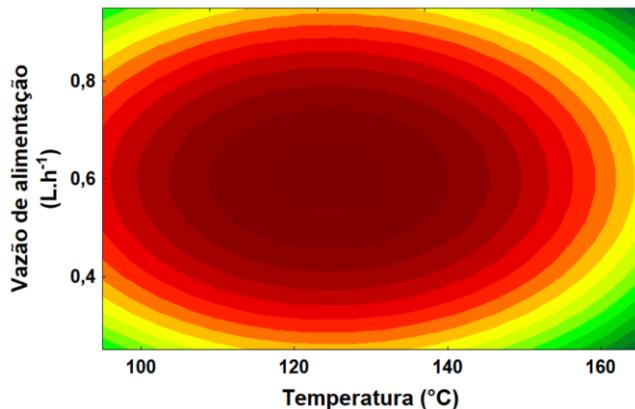
Os teores de clorofila total apresentados na Figura 4.44 variaram entre 1787 e 2819 mg por 100 g de amostra em base seca, sendo o menor valor registrado no experimento 8 (150 °C, 0,8 L·h, 1,1 m³·min⁻¹), e os maiores valores nos pontos centrais (experimentos 15 e 16), com 2799 e 2819 mg por 100 g de amostra em base seca. Na análise estatística dos resultados do PCCR, ao realizar a regressão múltipla para ajuste do modelo e estimativa dos efeitos das variáveis independentes, a análise residual identificou o experimento 9 (da matriz do planejamento) como um *outlier* em relação ao valor observado essa variável resposta, motivo pelo qual foi excluído da regressão. A equação empírica, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação do teor de clorofila do produto seco, é apresentada na Equação 4.24. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,9427.

$$Y_{15} = 2815,35 - 112,54 * X_2 - 109,11 * X_4 - 208,83 * X_2^2 - 252,67 \\ * X_3^2 - 196,12 * X_4^2 \quad (4.24)$$

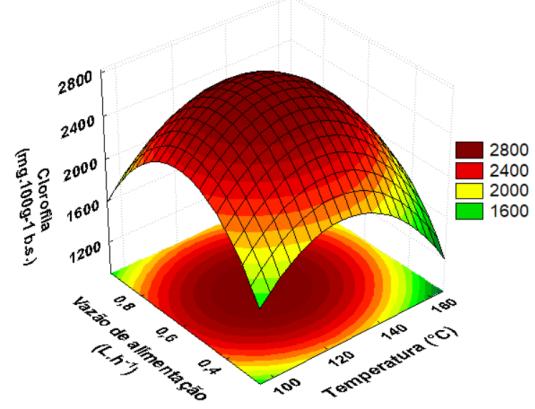
Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno geradas a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.45.

Figura 4.45 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para concentração de clorofila, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

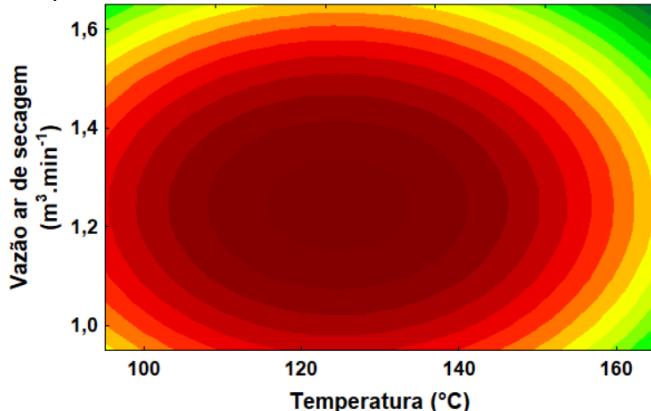
a.1)



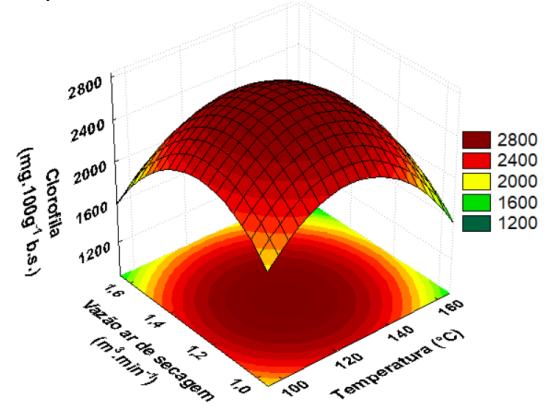
a.2)



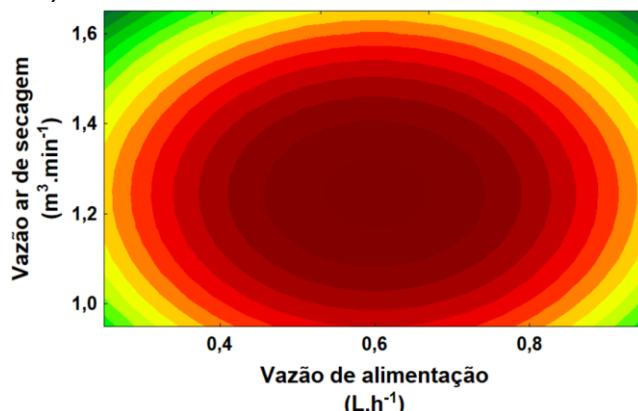
b.1)



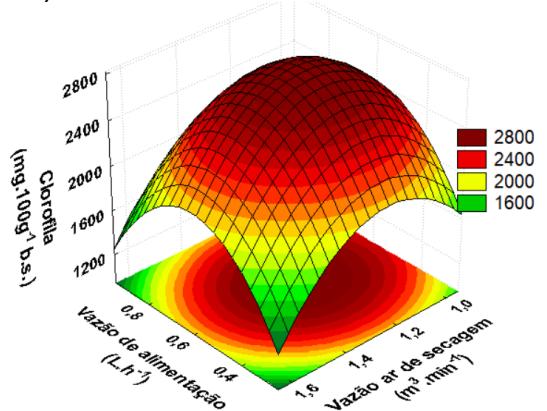
b.2)



c.1)



c.2)



Fonte: dados da pesquisa.

No planejamento fatorial 2^4 inicialmente realizado, verificou-se que, em dois níveis, somente a temperatura influenciou, de forma linear, a variação da clorofila nos pós de grama de trigo na faixa experimental considerada. Com a expansão do planejamento para o PCCR, ampliando a faixa experimental e avaliando cinco níveis,

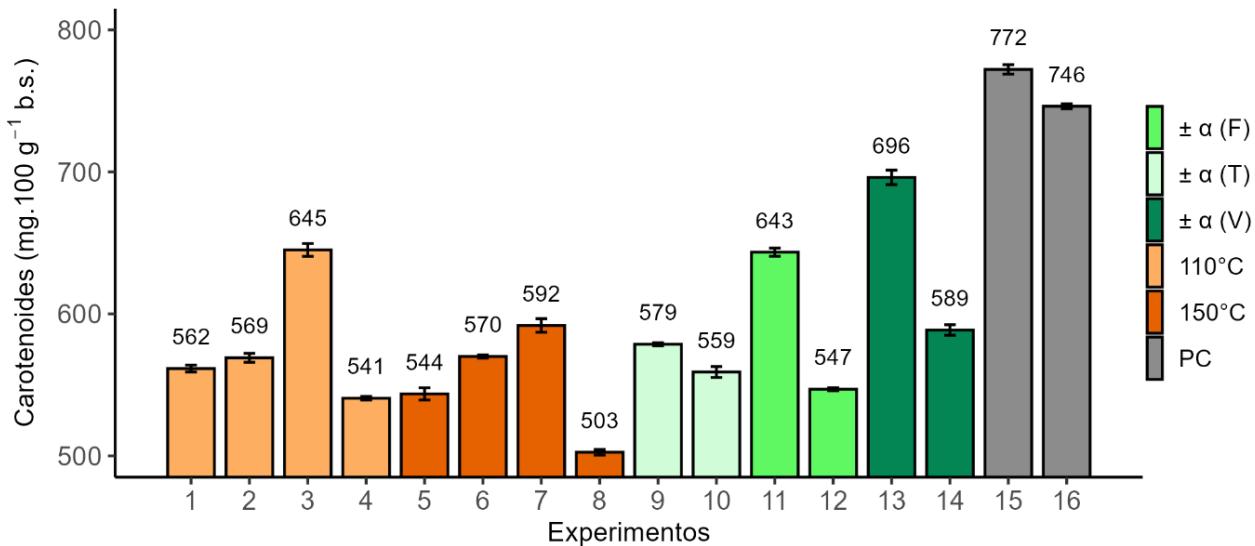
além da temperatura do ar de secagem, as variáveis vazão de alimentação e vazão do ar de secagem também apresentaram efeitos significativos, com termos linear e/ou quadrático, mostrando comportamento não linear dessas variáveis. As superfícies de resposta e as curvas de contorno indicaram que os maiores teores de clorofila total foram obtidos com a combinação de temperaturas de secagem e vazões de alimentação em níveis intermediários (Figura 4.45a). Já em níveis extremos - tanto baixos quanto altos – de temperatura e vazão de alimentação, os teores foram consideravelmente menores, sugerindo que ambos os fatores, em condições extremas, prejudicam a preservação do pigmento. O mesmo padrão foi observado quando se analisou simultaneamente a influência da temperatura de secagem e vazão de ar (Figura 4.45b), em que níveis intermediários de ambas as variáveis resultaram em maiores concentrações de clorofila. Temperaturas elevadas intensificaram a degradação do pigmento, possivelmente devido à maior taxa de calor sobre as partículas durante a secagem (Deng *et al.*, 2019). Em temperaturas muito baixas as partículas apresentam maior umidade, favorecendo reações de instabilidade e degradação de compostos bioativos como pigmentos, mesmo sem a ação direta do calor (Eijkelboom *et al.*, 2023). O teor de clorofila foi maior em faixas intermediárias de temperatura, em que houve equilíbrio entre eficiência de secagem e minimização dos danos térmicos.

Em vazões de alimentação muito baixas, a formação de partículas muito pequenas pode favorecer perdas por degradação térmica, enquanto vazões muito altas reduzem a eficiência da secagem, resultando em partículas com maior teor de umidade residual. Nesse contexto, partículas mais leves tendem a ser removidas mais rapidamente da câmara, com menor tempo de permanência no ar quente, enquanto partículas formadas sob vazões elevadas podem reter mais umidade, favorecendo alterações físico-químicas subsequentes. Vazões de ar excessivamente altas ou muito baixas também resultaram em menores teores de clorofila, sugerindo que, no primeiro caso, partículas mais leves podem ser removidas precocemente da câmara, enquanto no segundo caso a secagem é menos eficiente, prolongando o aquecimento da amostra. Assim, as superfícies e as curvas de contorno demonstram que a preservação da clorofila durante a secagem por atomização está associada ao equilíbrio entre os parâmetros operacionais.

4.3.2.2.7.2 Carotenoides

A Figura 4.46 apresenta os resultados experimentais de carotenoides totais dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, conforme PCCR o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.46 - Resultados de clorofila total dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme PCCR.



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

Os teores de carotenoides totais variaram de 503 a 772 mg por 100 g de amostra em base seca, sendo o menor valor registrado no experimento 8 (150 °C, 0,8 L·h, 1,1 m³·min⁻¹), e os maiores valores observados nos pontos centrais (experimentos 15 e 16), com 772 e 746 mg por 100 g de amostra em base seca, respectivamente. A equação empírica do modelo reduzido, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação da concentração de clorofila no produto seco, é apresentada na Equação 4.25. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,921.

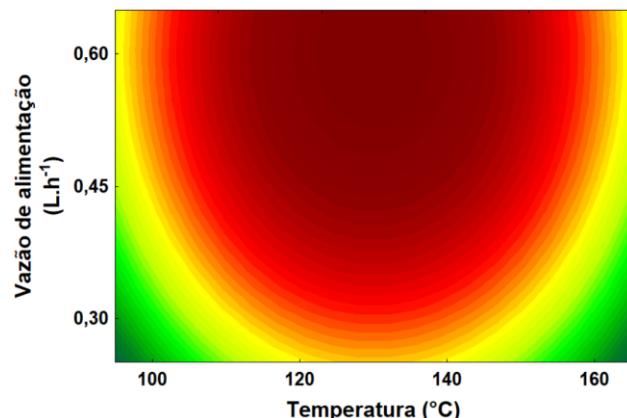
$$\begin{aligned} Y_{16} = & 761,83 - 24,94 * X_4 - 73,61 * X_2^2 - 64,29 * X_3^2 - 47,61 * X_4^2 \\ & - 28,46 * X_4 * X_3 \end{aligned} \quad (4.25)$$

No planejamento fatorial 2⁴, apenas a variável tratamento térmico (X_1) apresentou efeito significativo sobre o teor de carotenoides. Entretanto, ao fixar o processo com uso de amostras branqueadas e expandir o planejamento por meio do PCCR, ampliando a faixa experimental e avaliando cinco níveis, foi possível capturar

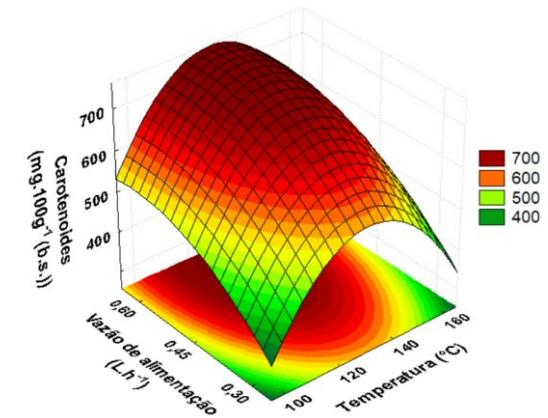
efeitos não lineares que antes não podiam ser identificados. Nesse contexto, verificaram-se efeitos lineares e de interação que anteriormente não haviam sido significativos. Assim destacam-se os efeitos linear e quadrático da vazão do ar de secagem (X_4), e os efeitos quadráticos da temperatura de secagem (X_2) e da vazão de alimentação (X_3), além da interação entre vazão de alimentação e vazão do ar. Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno obtidas a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.47.

Figura 4.47 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para concentração de carotenoides, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

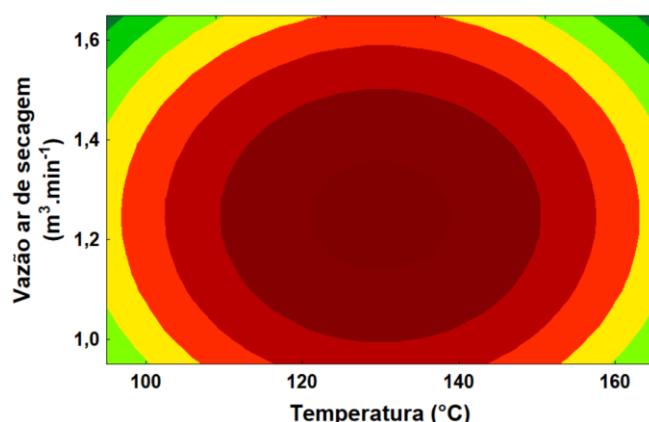
a.1)



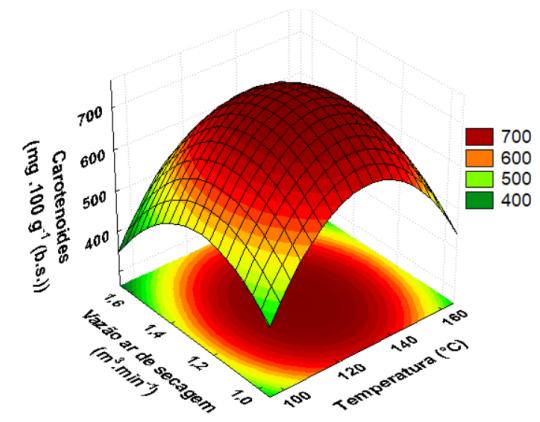
a.2)



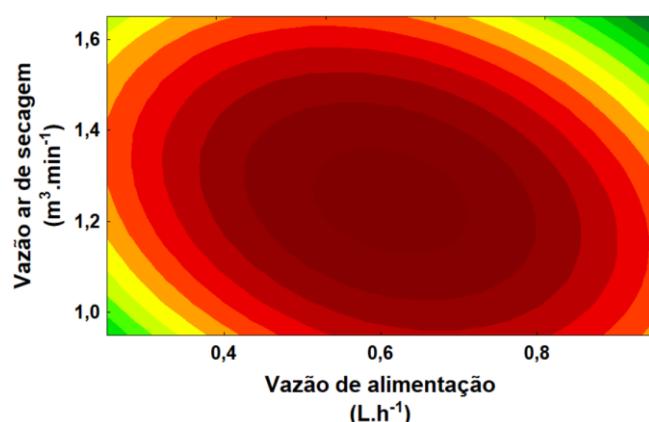
b.1)



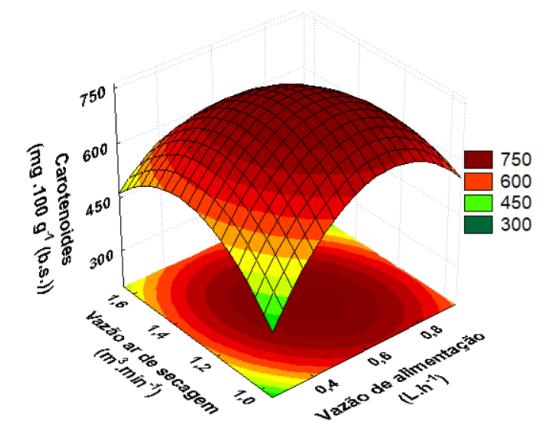
b.2)



c.1)



c.2)



Fonte: dados da pesquisa.

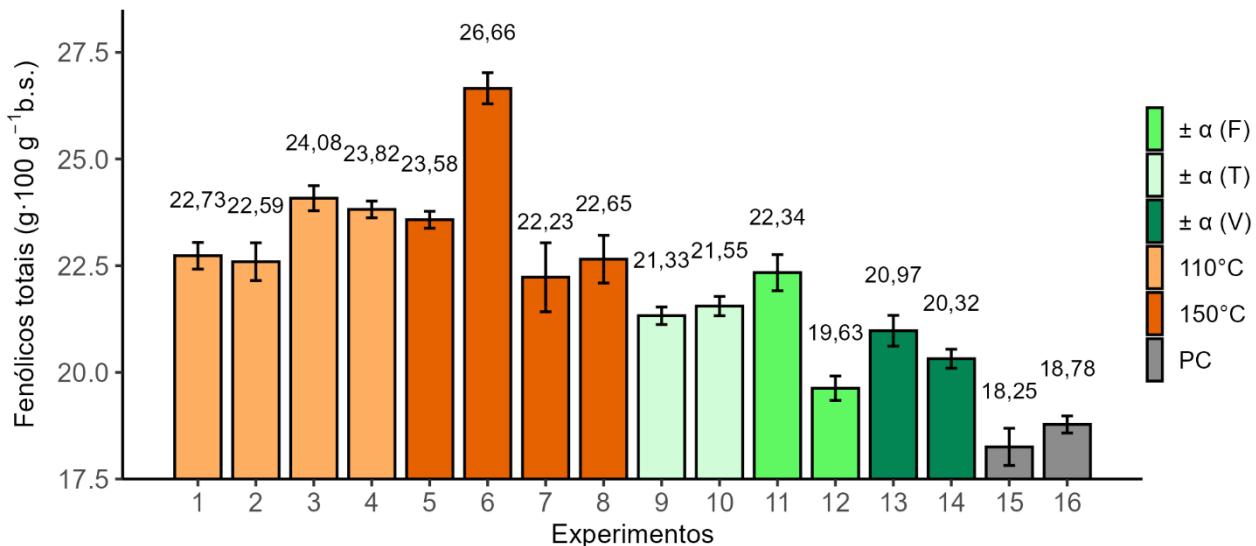
As superfícies de resposta e as curvas de contorno indicaram que os maiores teores de carotenoides foram obtidos em regiões próximas aos níveis intermediários das variáveis independentes. A posição exata da região de máximos, entretanto, pode ser influenciada pela presença e pela intensidade dos termos lineares e de interação (quando significativos), podendo sofrer leve deslocamento nesses casos. Nesse sentido, a partir das Figuras 4.47 verifica-se que concentrações de carotenoides mais elevadas foram obtidas com combinação de temperaturas e vazões de ar de secagem intermediárias. Esse efeito foi semelhante aos resultados obtidos para o teor de clorofila, nos quais observou-se que temperaturas mais elevadas favoreceram a degradação térmica desses compostos bioativos, possivelmente devido à maior exposição ao calor durante o processo de secagem. Em contrapartida, em temperaturas muito baixas, a secagem ocorre de forma mais lenta mantendo as partículas úmidas por mais tempo, aumentando sua exposição ao oxigênio e à luz e favorecendo a degradação oxidativa dos carotenoides como em um processo em batelada realizado (Eijkelboom *et al.*, 2023).

Em baixas vazões de alimentação, a formação de partículas muito pequenas pode ter aumentado a exposição superficial dos carotenoides, intensificando a degradação. Já vazões muito altas dificultam a secagem completa, favorecendo a retenção de umidade e o aquecimento prolongado das partículas, o que também contribui para perdas nos teores de carotenoides. Ainda, vazões de ar de secagem muito altas podem reduzir o tempo de residência das partículas na câmara, limitando a secagem, enquanto vazões muito baixas diminuem o coeficiente convectivo de transferência de calor, reduzindo a eficiência do processo. Dessa forma, a preservação dos carotenoides foi favorecida por uma condição de equilíbrio entre intensidade de secagem e tempo de exposição térmica, característica de pontos intermediários nas faixas avaliadas.

4.3.2.2.7.3 Fenólicos Totais

A Figura 4.48 apresenta os resultados experimentais de compostos fenólicos totais dos pós de grama de trigo obtidos por *spray drying*, conforme PCCR o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.48 - Resultados de compostos fenólicos totais dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme PCCR



Dados apresentados no formato médias ± desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

A análise da Figura 4.48 mostra que para os compostos fenólicos totais foram obtidos valores entre 18,25 e 26,61 g EAG por 100 g de amostra em base. O maior valor foi observado no experimento 6 (150°C , $0,4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $1,5 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$). Já o menor valor foi encontrado nos pontos centrais (experimentos 15 e 16). A equação empírica, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação da concentração de compostos fenólicos totais no produto seco, é apresentada na Equação 4.26. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,8239. Durante a análise residual, o experimento 14 (da matriz do planejamento PCCR) foi identificado como um *outlier* e, por isso, foi desconsiderado da regressão. Após a exclusão, os resíduos apresentaram comportamento aleatório, sendo independentes e identicamente distribuídos com distribuição normal em torno da média zero e variância constante, atendendo aos pressupostos do modelo de regressão.

$$Y_{13} = 18,37 + 1,39 * X_2^2 + 1,22 * X_3^2 + 1,96 * X_4^2 \quad (4.26)$$

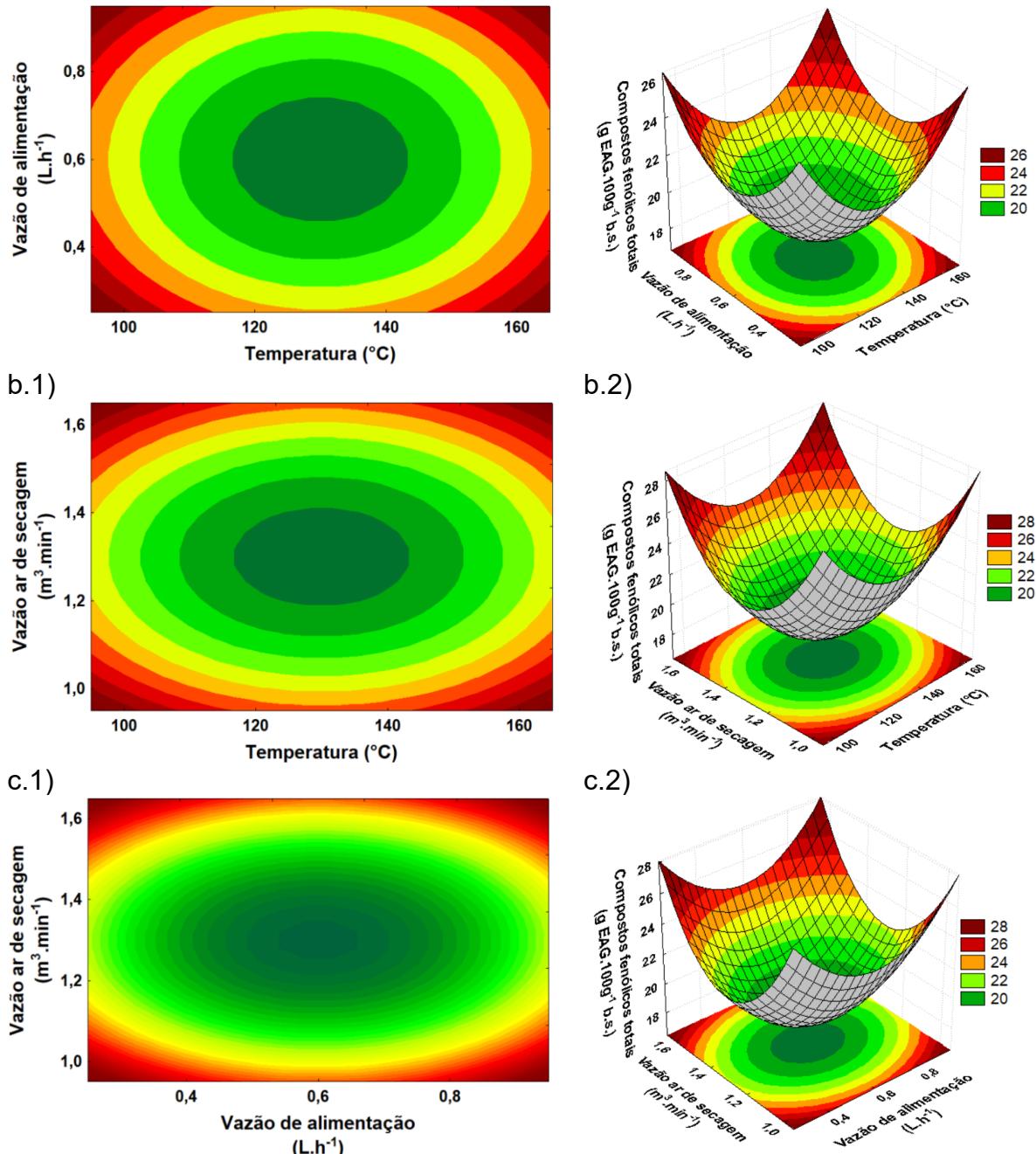
No planejamento fatorial 2^4 inicialmente realizado, a apenas a variável de tratamento térmico foi significativa. Com a expansão para o PCCR, foi observado significância dos termos na forma quadráticos. Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno gerados a partir da equação de regressão são apresentados na Figura (4.49).

No planejamento fatorial 2^4 inicialmente realizado, a apenas a variável referente ao tratamento térmico foi significativa. Com a expansão para o PCCR, ampliando a faixa experimental e avaliando cinco níveis, tornou-se possível identificar efeitos não lineares que anteriormente não eram observáveis, sendo que os termos quadráticos apresentaram significância estatística. Para melhor visualização dos efeitos dos fatores, as superfícies de resposta e as curvas de contorno geradas a partir da equação de regressão são apresentados na Figura 4.49.

Figura 4.49 - Curvas de contorno (1) e superfícies de resposta (2) para concentração de fenólicos totais nos pós, em função de: a) temperatura do ar de secagem e vazão de alimentação (com a vazão do ar de secagem mantida no nível central ($X_4=0$)); b) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a vazão do ar de alimentação mantida no nível central ($X_3=0$))); c) vazão de alimentação e vazão do ar de secagem (com a temperatura do ar de secagem mantida no nível central ($X_2=0$))).

a.1)

a.2)



Fonte: dados da pesquisa.

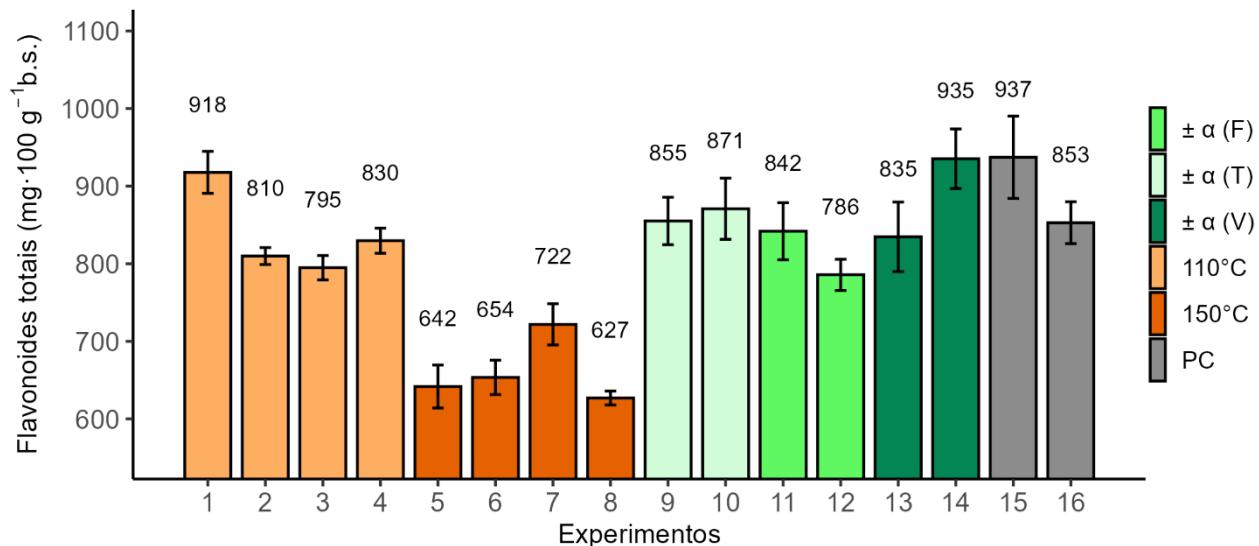
As superfícies de resposta revelaram que os maiores teores de compostos fenólicos totais foram encontrados nas condições extremas das faixas experimentais (níveis mais baixos e mais altos) avaliadas para as três variáveis de processo. Como muitos fenólicos estão presentes na forma conjugada ou associados estruturalmente à parede celular, a quebra dessas ligações em condições mais intensas pode favorecer sua extração e, consequentemente, sua detecção analítica (Balasundram; Sundram; Samman, 2006; Gomes *et al.*, 2018). Em condições mais intensas de temperatura e vazão de ar de secagem, a quebra de ligações dos compostos fenólicos

com a matriz celular pode facilitar a extração dos compostos. Já em temperaturas muito baixas, o aumento pode decorrer da menor degradação térmica. Em altas vazões de alimentação, a maior umidade residual protege os compostos do calor, enquanto em vazões baixas a redução do tamanho das partículas aumenta a área superficial, favorecendo a liberação de compostos durante a extração.

4.3.2.2.7.4 Flavonoides Totais

A Figura 4.50 apresenta os resultados experimentais de teor de flavonoides totais dos pós de grama de trigo obtidos por spray drying, conforme PCCR o planejamento descrito no tópico 4.2.3.

Figura 4.50 - Resultados de flavonoides totais dos pós de grama de trigo seca por *spray drying* conforme PCCR



Dados apresentados no formato médias \pm desvio padrão. Em α corresponde aos pontos axiais do PCCR e às PC os as réplicas do ponto central. Fonte: dados da pesquisa.

A equação empírica do modelo reduzido, contendo apenas os coeficientes significativos (considerando um nível de significância de 10%), obtida para representar a variação da concentração de flavonoides do produto seco, é apresentada na Equação 4.27. O coeficiente de determinação (R^2) para essa equação foi de 0,8263. Durante a análise residual, o experimento 10 (da matriz do planejamento PCCR) foi identificado como um outlier e, por isso, foi excluído da regressão. Após a exclusão, os resíduos apresentaram comportamento aleatório, sendo independentes e identicamente distribuídos com distribuição normal em torno da média zero e variância constante, atendendo aos pressupostos do modelo de regressão.

$$Y_{14} = 898,3987 - 96,7265 * X_2 - 86,6104 * X_2^2 \quad (4.27)$$

No modelo ajustado a partir do PCCR apenas a variável temperatura do ar de secagem (X_2) foi significativo, tanto pelo termo linear quanto pelo quadrático, ambos com coeficientes negativos. O fato de o coeficiente linear apresentar maior magnitude em relação ao quadrático indica que a tendência predominante foi de redução dos teores de flavonoides com o aumento da temperatura, de modo que os menores valores foram associados às condições mais elevadas. Ainda assim, a presença do termo quadrático significativo sugere a existência de um ponto de máximo em níveis intermediários de temperatura, antes do declínio acentuado esse comportamento reflete a sensibilidade térmica dos flavonoides, suscetíveis à degradação em temperaturas excessivas (Ahmed; Eun, 2018).

4.3.3 Conclusão

Os resultados da secagem da grama de trigo por *spray drying*, realizada conforme o planejamento fatorial 2⁴, demonstraram-se satisfatórios, considerando a caracterização do produto obtido, e permitiram a avaliação do efeito das variáveis independentes investigadas: tratamento térmico (branqueamento), temperatura de secagem, vazão de alimentação e velocidade do ar de secagem na produção de grama de trigo em pó. A secagem por *spray drying* mostrou-se eficiente para a obtenção de pós com baixo teor de umidade e atividade de água.

O branqueamento térmico se mostrou eficiente na preservação de compostos bioativos na matriz foliar *in natura*, favorecendo a liberação do interior da célula vegetal. Além disso, destaca-se que as amostras pré-tratadas apresentaram rendimento superior, possivelmente devido à maior ruptura da matriz celular, facilitando a atomização e a secagem. Também, o branqueamento se mostrou favorável na obtenção de um pó de menor umidade e com melhor preservação da cor verde característica, embora tenha resultado a uma menor solubilidade.

O planejamento composto central permitiu uma melhor avaliação dos efeitos das variáveis operacionais sobre as características de processo dos pós de grama de trigo com as amostras que foram previamente submetidas ao branqueamento. Em geral, os maiores rendimentos de secagem foram obtidos nos níveis intermediários das variáveis nas faixas experimentais investigadas. A aderência do pó nas paredes do equipamento e a perda por pela saída overflow contribuíram para essa redução.

No que diz respeito à característica física avaliada, notou-se que em geral, mesmo que a variação global de cor tenha sido relativamente alta, foram obtidos pós com a preservação desejada da cor verde característica e com coloração intensa.

Ainda foi observado que pós com maior densidade de bulk, acima de 0,35 g/cm³ estavam associados a menores teores de umidade (inferiores a 5%) e a solubilidades mais baixas, próximas a 50. Isso indica que, embora a densidade de bulk mais elevada favoreça o empacotamento do produto, ela pode estar ligada à formação de partículas mais compactas e menos porosas, que dificultando a reidratação. Em contrapartida, amostras com menor densidade de bulk (aproximadamente 0,29 g/ cm³)

apresentaram maior umidade residual e solubilidade superior a 60%, sugerindo que partículas mais leves e porosas tenham facilidade na incorporação de água.

Foram identificadas condições, em geral, níveis intermediários nas faixas experimentais das variáveis analisadas nas quais os teores dos compostos bioativos apresentaram maiores valores, indicando melhor qualidade nutricional. No entanto, devido à quebra da estrutura celular durante o processo de branqueamento, e consequente liberação de componentes celulares na suspensão a ser seca associado ao aumento da temperatura teve como tendência degradação de compostos bioativos, como observado para a redução dos resultados de flavonoides e carotenoïdes e clorofila total em temperatura mais elevadas.

CAPÍTULO 5 Conclusões gerais

A análise bibliométrica apresentada no Capítulo 3, mostrou um crescimento no interesse científico pela grama de trigo, especialmente a partir de 2014, com destaque para áreas como ciência dos alimentos, farmacologia e nutrição. No entanto, apesar do aumento nas publicações, a bibliometria também revelou que são poucos os estudos que exploram aplicações tecnológicas da grama de trigo na forma de ingredientes processados para a indústria de alimentos. A maioria dos trabalhos tem foco em aspectos nutricionais e funcionais do consumo *in natura* ou de extratos. Assim, verificou-se uma oportunidade de pesquisas no desenvolvimento de processos de conservação, como a secagem, que ampliem as aplicações e a vida útil.

O capítulo 4 deste trabalho apresentaram uma análise detalhada sobre o uso do *spray drying* para a produção de pó a partir de suspensão de grama de trigo, com foco na avaliação da influência do branqueamento como pré-tratamento, na quantificação e avaliação dos efeitos das variáveis de processo e na identificação das melhores condições.

A partir do planejamento fatorial 2⁴ que foi executado, foi possível avaliar o efeito das variáveis de processo estudadas: temperatura de entrada, vazão do ar, vazão de alimentação e principalmente a aplicação do branqueamento, sobre as propriedades físico-químicas do pó de grama de trigo obtido. Os resultados indicaram que o branqueamento exerceu papel na preservação da cor. Embora tenha ocorrido degradação de compostos de bioativos em temperaturas mais elevadas, os resultados indicaram que tratamento térmico aumentou a disponibilidade de compostos bioativos na suspensão.

O uso do PCCR possibilitou uma melhor avaliação da influência das variáveis de processo, permitindo identificar as condições mais favoráveis para a obtenção de um pó de grama de trigo com características físico-químicas satisfatórias. Portanto, a secagem por *spray drying* é uma alternativa viável e promissora para a conservação da grama de trigo.

REFERÊNCIAS

AHMED, M.; EUN, J.-B. Flavonoids in fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, [s. l.], v. 58, n. 18, p. 3159–3188, 2018. ISSN: 1040-8398. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1353480>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2017.1353480>.

AKBAS, E. *et al.* Wheatgrass juice to wheat grass powder: Encapsulation, physical and chemical characterization. *Journal of Functional Foods*, [s. l.], v. 28, p. 19–27, 2017. ISSN: 17564646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.11.010>.

ALI, N. *et al.* Effect of thermal, high hydrostatic pressure, and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation, vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice. *Journal of Food Process Engineering*, [s. l.], v. 43, n. 1, 2020. ISSN: 17454530. DOI: <https://doi.org/10.1111/JFPE.13036>. Acesso em: 2 nov. 2024.

AVISAR, A. *et al.* Extracellular Vesicles Reflect the Efficacy of Wheatgrass Juice Supplement in Colon Cancer Patients During Adjuvant Chemotherapy. *Frontiers in Oncology*, [s. l.], v. 10, 2020 a. ISSN: 2234-943X. DOI: <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.01659>.

AVISAR, A. *et al.* Wheatgrass Juice Administration and Immune Measures during Adjuvant Chemotherapy in Colon Cancer Patients: Preliminary Results. *Pharmaceuticals*, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 129, 2020 b. ISSN: 1424-8247. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph13060129>.

AYDOS, O. S. *et al.* Antiproliferative, apoptotic and antioxidant activities of wheatgrass (*Triticum aestivum L.*) extract on CML (K562) cell line. Turkish Journal of Medical Sciences, [s. l.], 2011. ISSN: 1303-6165. DOI: <https://doi.org/10.3906/sag-0912-425>. Disponível em: <https://journals.tubitak.gov.tr/medical/vol41/iss4/13>.

BALASUNDRAM, N.; SUNDRAM, K.; SAMMAN, S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chemistry, [s. l.], v. 99, n. 1, p. 191–203, 2006. ISSN: 03088146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814605006242>.

BANERJEE, S. *et al.* Wheatgrass inhibits the lipopolysaccharide-stimulated inflammatory effect in RAW 264.7 macrophages. Current Research in Toxicology, [s. l.], v. 2, p. 116–127, 2021. ISSN: 2666-027X. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CRTOX.2021.02.005>. Acesso em: 20 maio. 2024.

BARBACARIU, C.-A. *et al.* Evaluation of Diet Supplementation with Wheat Grass Juice on Growth Performance, Body Composition and Blood Biochemical Profile of Carp (*Cyprinus carpio L.*). Animals, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 2589, 2021. ISSN: 2076-2615. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11092589>.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. *et al.* Food Powders. Kluwer AcademiC ed., Boston, MA: Springer US, 2005. 381 p. (Food Engineering Series). ISBN: 978-0-306-47806-2. DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0>. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/0-387-27613-0>.

BAR-SELA, G. *et al.* The Medical Use of Wheatgrass: Review of the Gap Between Basic and Clinical Applications. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, [s. l.],

v. 15, n. 12, p. 1002–1010, 2015. ISSN: 13895575. DOI: <https://doi.org/10.2174/138955751512150731112836>.

BAR-SELA, G. *et al.* Wheat Grass Juice May Improve Hematological Toxicity Related to Chemotherapy in Breast Cancer Patients: A Pilot Study. Nutrition and Cancer, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 43–48, 2007. ISSN: 0163-5581. DOI: <https://doi.org/10.1080/01635580701308083>.

BAWA, K. *et al.* Influence of Wheatgrass Juice on Techno-Functional Properties and Bioactive Characteristics of Pasta. Journal of Food Quality, [s. l.], v. 2022, p. 1–12, 2022 a. ISSN: 1745-4557. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3891983>.

BAWA, K. *et al.* Wheatgrass powder-enriched functional pasta: Techno-functional, phytochemical, textural, sensory, and structural characterization. Journal of Texture Studies, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 517–530, 2022 b. ISSN: 0022-4901. DOI: <https://doi.org/10.1111/jtxs.12680>.

BENINCASA, P. *et al.* Phenolic compounds in grains, sprouts and wheatgrass of hulled and non-hulled wheat species. Journal of the Science of Food and Agriculture, [s. l.], v. 95, n. 9, p. 1795–1803, 2015. ISSN: 0022-5142. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6877>.

BIOPLANT. Bioplant Vasos e Floreiras. 2025. Disponível em: <https://www.bioplant.com.br/produtos/>. Acesso em: 31 mar. 2025.

BOX, G.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building. 1. ed., New York: John Wiley & Sons, 1978. 1–653 p. ISBN: 978-0471093152.

BRAGA, V. *et al.* Production and characterization of pineapple-mint juice by spray drying. Powder Technology, [s. l.], v. 375, p. 409–419, 2020. ISSN: 00325910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.012>.

BURGAIN, J. *et al.* Surface chemistry and microscopy of food powders. Progress in Surface Science Elsevier Ltd, 2017. (4) ISSN: 00796816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2017.07.002>.

CAI, J. Q. *et al.* Chlorophylls derivatives: Photophysical properties, assemblies, nanostructures and biomedical applications. Materials Today, [s. l.], v. 45, p. 77–92, 2021. ISSN: 1369-7021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2020.11.001>. Acesso em: 20 maio. 2024.

CAI, Y. Z.; CORKE, H. Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. Journal of Food Science, [s. l.], v. 65, n. 7, p. 1248–1252, 2000. ISSN: 0022-1147. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x>. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x>.

CALLAHAN, J. C. *et al.* Equilibrium Moisture Content of Pharmaceutical Excipients. Drug Development and Industrial Pharmacy, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 355–369, 1982. ISSN: 0363-9045. DOI: <https://doi.org/10.3109/03639048209022105>.

CETINER, B. *et al.* Utilization of Intermediate Wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) as an Innovative Ingredient in Bread Making. Foods 2023, Vol. 12, Page 2109, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2109, 2023. ISSN: 2304-8158. DOI:

<https://doi.org/10.3390/FOODS12112109>. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/2304-8158/12/11/2109/htm>. Acesso em: 8 maio. 2024.

CHAKRABORTY, R. *et al.* Fluidized Bed Drying of Wheatgrass: Effect of Temperature on Drying Kinetics, Proximate Composition, Functional Properties, and Antioxidant Activity. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 1576, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1576, 2023. ISSN: 2304-8158. DOI: <https://doi.org/10.3390/FOODS12081576>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/8/1576/htm>. Acesso em: 8 maio. 2024.

CHAUHAN, M. A pilot study on wheat grass juice for its phytochemical, nutritional and therapeutic potential on chronic diseases. *International Journal of Chemical Studies*, [s. l.], v. 2, n. 4, 2014. ISSN: 2321-4902. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-pilot-study-on-wheat-grass-juice-for-its-and-on-Chauhan/73f2bb7c0b1129b5da66ca284eb2294d956fa9d2>. Acesso em: 31 mar. 2025.

CHEN, M. *et al.* Food-drug interactions precipitated by fruit juices other than grapefruit juice: An update review. *Journal of Food and Drug Analysis*, [s. l.], v. 26, n. 2, p. S61–S71, 2018. ISSN: 10219498. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFDA.2018.01.009>. Acesso em: 2 nov. 2024.

CHOE, U.; YU, L. L.; WANG, T. T. Y. The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, [s. l.], v. 66, n. 44, p. 11519–11530, 2018. ISSN: 15205118. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03096>.

CLEMENT, Y. N. *et al.* Herbal remedies and functional foods used by cancer patients attending specialty oncology clinics in Trinidad. *BMC Complementary and*

Alternative Medicine, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 399, 2016. ISSN: 1472-6882. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1380-x>.

CLYDE-SMITH, D.; CAMPOS, L. C. Engineering Hydroponic Systems for Sustainable Wastewater Treatment and Plant Growth. Applied Sciences (Switzerland), [s. l.], v. 13, n. 14, p. 8032, 2023. ISSN: 20763417. DOI: <https://doi.org/10.3390/APP13148032/S1>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/14/8032/htm>. Acesso em: 8 maio. 2024.

COLMER, T. D.; FLOWERS, T. J.; MUNNS, R. Use of wild relatives to improve salt tolerance in wheat. Journal of Experimental Botany, [s. l.], v. 57, n. 5, p. 1059–1078, 2006. ISSN: 1460-2431. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erj124>.

CORES RODRÍGUEZ, F. et al. Nutritional and physicochemical properties of wheatgrass juice and preservation strategies. Food Chemistry Advances, [s. l.], v. 1, p. 100136, 2022. ISSN: 2772-753X. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2022.100136>. Acesso em: 5 dez. 2023.

CWTS. CitNetExplorer. 2014. Disponível em: <https://www.citnetexplorer.nl/>. Acesso em: 2 fev. 2025.

DACANAL, G. C. Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leito fluidizado. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2005.336802>. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=462413>.

DANTAS, A. *et al.* Innovations in spray drying technology for liquid food processing: design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*, [s. l.], p. 100382, 2023. ISSN: 27725022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>.

DAS, P. *et al.* Acute toxicity test of a natural iron chelator and an antioxidant, extracted from *Triticum aestivum* Linn. (wheat grass). *Natural Product Research*, [s. l.], v. 28, n. 17, p. 1379–1382, 2014. ISSN: 1478-6419. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2014.901321>.

DE ARAÚJO, F. F. *et al.* Polyphenols and their applications: An approach in food chemistry and innovation potential. *Food Chemistry*, [s. l.], v. 338, p. 127535, 2021. ISSN: 03088146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127535>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814620313972>. Acesso em: 30 abr. 2024.

DENG, L.-Z. *et al.* Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, [s. l.], v. 59, n. 9, p. 1408–1432, 2019. ISSN: 1040-8398. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1409192>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2017.1409192>.

DEVI, C. B. *et al.* Comparison of ascorbic acid, beta-carotene, chlorophyll and antioxidant activity of fresh and dry wheatgrass (*Triticum aestivum* L.). *Applied Biological Research*, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 336–341, 2017. ISSN: 0972-0979. DOI: <https://doi.org/10.5958/0974-4517.2017.00048.9>. Disponível em: <https://typeset.io/papers/comparison-of-ascorbic-acid-beta-carotene-chlorophyll-and-1d4h3ex8rx>. Acesso em: 22 set. 2024.

DEVI, C. B.; BAINS, K.; KAUR, H. Effect of drying procedures on nutritional composition, bioactive compounds and antioxidant activity of wheatgrass (*Triticum aestivum L.*). *Journal of food science and technology*, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 491–496, 2019 a. ISSN: 0022-1155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3473-7>. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30728593>. Acesso em: 9 jan. 2024.

DEV I, C. B.; BAINS, K.; KAUR, H. Effect of drying procedures on nutritional composition, bioactive compounds and antioxidant activity of wheatgrass (*Triticum aestivum L.*). *Journal of Food Science and Technology*, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 491–496, 2019 b. ISSN: 0022-1155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3473-7>.

DHAMI, N.; CAZZONELLI, C. I. Environmental impacts on carotenoid metabolism in leaves. *Plant Growth Regulation*, [s. l.], v. 92, n. 3, p. 455–477, 2020. ISSN: 0167-6903. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00661-w>.

DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, [s. l.], v. 133, p. 285–296, 2021. ISSN: 01482963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.

DURAIRAJ, V. *et al.* Effect of Wheatgrass on Membrane Fatty Acid Composition During Hepatotoxicity Induced by Alcohol and Heated PUFA. *The Journal of Membrane Biology*, [s. l.], v. 247, n. 6, p. 515–521, 2014 a. ISSN: 0022-2631. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00232-014-9661-0>.

DURAIRAJ, V. *et al.* Phytochemical screening and analysis of antioxidant properties of aqueous extract of wheatgrass. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, [s. l.], v. 7, n. S1, p. S398–S404, 2014 b. ISSN: 19957645. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(14\)60265-0](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(14)60265-0). Acesso em: 17 abr. 2024.

EIJKELBOOM, N. M. *et al.* Particle structure development during spray drying from a single droplet to pilot-scale perspective. *Journal of Food Engineering*, [s. l.], v. 337, p. 111222, 2023. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111222>.

EKAMBARAM, R. *et al.* Fabrication of wheatgrass incorporated PCL/chitosan biomimetic nanoscaffold for skin wound healing: In vitro and In silico analysis. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, [s. l.], v. 71, p. 103286, 2022. ISSN: 1773-2247. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2022.103286>. Acesso em: 27 abr. 2024.

FENG, S. *et al.* Systematic Review of Phenolic Compounds in Apple Fruits: Compositions, Distribution, Absorption, Metabolism, and Processing Stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, [s. l.], v. 69, n. 1, p. 7–27, 2021. ISSN: 0021-8561. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05481>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.0c05481>.

FERRUZZI, M. G.; BLAKESLEE, J. Digestion, absorption, and cancer preventative activity of dietary chlorophyll derivatives. *Nutrition Research*, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 1–12, 2007. ISSN: 02715317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2006.12.003>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0271531706002934>.

FRIEDMAN-HEIMAN, A.; MILLER, S. A. The impact of refrigeration on food losses and associated greenhouse gas emissions throughout the supply chain. *Environmental Research Letters*, [s. l.], v. 19, n. 6, 2024. ISSN: 17489326. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4c7b>.

GARG, M. *et al.* Vitamins in Cereals: A Critical Review of Content, Health Effects, Processing Losses, Bioaccessibility, Fortification, and Biofortification Strategies for Their Improvement. *Frontiers in Nutrition*, [s. l.], v. 8, 2021. ISSN: 2296861X. DOI: <https://doi.org/10.3389/FNUT.2021.586815>. Acesso em: 2 nov. 2024.

GEORGE, S. *et al.* Impact of processing parameters on the quality attributes of spray-dried powders: a review. *European Food Research and Technology*, [s. l.], v. 249, n. 2, p. 241–257, 2023. ISSN: 1438-2377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04170-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00217-022-04170-0>.

GHUMMAN, A.; SINGH, N.; KAUR, A. Chemical, nutritional and phenolic composition of wheatgrass and pulse shoots. *International Journal of Food Science & Technology*, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 2191–2200, 2017. ISSN: 0950-5423. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13498>.

GOMES, W. F. *et al.* Effect of freeze- and spray-drying on physico-chemical characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of papaya pulp. *Journal of Food Science and Technology*, [s. l.], v. 55, n. 6, p. 2095–2102, 2018. ISSN: 0022-1155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3124-z>.

GORE, R. D.; PALASKAR, S. J.; BARTAKE, A. R. Wheatgrass: Green blood can help to fight cancer. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, [s. l.], v. 11, n. 6, p. ZC40–ZC42, 2017. ISSN: 0973709X. DOI: <https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/26316.10057>.

GOVINDARAJAN, D. *et al.* Fabrication of Hybrid Collagen Aerogels Reinforced with Wheat Grass Bioactives as Instructive Scaffolds for Collagen Turnover and Angiogenesis for Wound Healing Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 10057–10067, 2019. ISSN: 1941-6029. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.applmaterif.8b05530>.

I.], v. 9, n. 20, p. 16939–16950, 2017. ISSN: 1944-8244. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b05842>.

GRUBIŠIĆ, S. *et al.* Effect of Wheatgrass Juice on Nutritional Quality of Apple, Carrot, Beet, Orange and Lemon Juice. Foods, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 445, 2022. ISSN: 2304-8158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11030445>.

HALIM, M. *et al.* Exploring bioactive compounds and antioxidant potentials in cake, biscuits, and papad innovations with wheatgrass powder (*Triticum aestivum L.*). Food Chemistry Advances, [s. l.], v. 4, p. 100705, 2024. ISSN: 2772753X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcha.2024.100705>.

HARTMANN, M.; PALZER, S. Caking of amorphous powders — Material aspects, modelling and applications. Powder Technology, [s. l.], v. 206, n. 1–2, p. 112–121, 2011. ISSN: 00325910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.04.014>.

HAYES, M.; FERRUZZI, M. G. Update on the bioavailability and chemopreventative mechanisms of dietary chlorophyll derivatives. Nutrition Research, [s. l.], v. 81, p. 19–37, 2020. ISSN: 02715317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.06.010>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0271531720304723>.

HUFT, A. *et al.* Optimizing protein recovery from plant substrate using ultrafiltration: A case study on wheatgrass. Journal of Agriculture and Food Research, [s. l.], v. 13, p. 100653, 2023. ISSN: 2666-1543. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100653>. Acesso em: 27 abr. 2024.

ISLAM, M. Z. *et al.* Influence of selenium biofortification on the bioactive compounds and antioxidant activity of wheat microgreen extract. *Food Chemistry*, [s. l.], v. 309, p. 125763, 2020. ISSN: 03088146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125763>.

JUAREZ-ENRIQUEZ, E. *et al.* Effect of water content on the flowability of hygroscopic powders. *Journal of Food Engineering*, [s. l.], v. 205, p. 12–17, 2017. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.024>.

KARAKAS, F. P. *et al.* Phenolic composition and antioxidant potential in Turkish einkorn, emmer, durum, and bread wheat grain and grass. *South African Journal of Botany*, [s. l.], v. 149, p. 407–415, 2022. ISSN: 02546299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.022>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254629922003180>. Acesso em: 5 dez. 2023.

KARAKAYA, S. Bioavailability of Phenolic Compounds. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, [s. l.], v. 44, n. 6, p. 453–464, 2004. ISSN: 1040-8398. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408690490886683>. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408690490886683>.

KAUR, N. *et al.* Effect of growing conditions on proximate, mineral, amino acid, phenolic composition and antioxidant properties of wheatgrass from different wheat (*Triticum aestivum L.*) varieties. *Food Chemistry*, [s. l.], v. 341, 2021. ISSN: 18737072. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128201>. Acesso em: 2 nov. 2024.

KAUR, B. *et al.* Phenolic Biotransformations in Wheatgrass Juice after Primary and Secondary Fermentation. *Foods*, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1624, 2023. ISSN: 2304-8158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12081624>.

KAUR, M. *et al.* Phytochemical and Pharmacological Overview of Triticum aestivum: An Update. Current Traditional Medicine, [s. l.], v. 8, n. 4, 2022. ISSN: 22150838. DOI: <https://doi.org/10.2174/2215083808666220428135532>.

KONICA MINOLTA. Comprendendo o Espaço de Cor CIE L*C*h. 2025. Disponível em: <https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/comprendendo-o-espaco-de-cor-cie-lch/#:~:text=O%20espa%C3%A7o%20de%20cor%20L,ao%20inv%C3%A9s%20de%20coordenadas%20retangulares>. Acesso em: 16 jul. 2025.

KULKARNI, S. D. *et al.* Evaluation of the antioxidant activity of wheatgrass (Triticum aestivum L.) as a function of growth under different conditions. Phytotherapy Research, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 218–227, 2006. ISSN: 0951418X. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.1838>.

LAI, C. Chlorophyll: The active factor in wheat sprout extract inhibiting the metabolic activation of carcinogens in vitro. Nutrition and Cancer, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 19–21, 1979. ISSN: 0163-5581. DOI: <https://doi.org/10.1080/01635587909513623>. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01635587909513623>.

LAI, C.; DABNEY, B. J.; SHAW, C. R. Inhibition of in vitro metabolic activation of carcinogens by wheat sprout extracts. Nutrition and Cancer, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 27–30, 1978. ISSN: 0163-5581. DOI: <https://doi.org/10.1080/01635587809513598>. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01635587809513598>.

LANGHORST, J. *et al.* Systematic Review of Complementary and Alternative Medicine Treatments in Inflammatory Bowel Diseases. Journal of Crohn's and Colitis,

[s. l.], v. 9, n. 1, p. 86–106, 2015. ISSN: 1876-4479. DOI: <https://doi.org/10.1093/ecco-jcc/jju007>.

LEONG, S. Y.; BURRITT, D. J.; OEH, I. Electropulsing of wheatgrass seeds using pulsed electric fields enhances antioxidant metabolism and the bioprotective capacity of wheatgrass shoots. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 6, 2016. ISSN: 20452322. DOI: <https://doi.org/10.1038/SREP25306>. Acesso em: 2 nov. 2024.

LIM, J.-E. *et al.* Optimization of blanching condition for removing potassium from spinach using response surface methodology. *Food Science and Biotechnology*, [s. l.], v. 34, n. 7, p. 1589–1596, 2025. ISSN: 1226-7708. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01782-y>.

MINOCHA, N.; SHARMA, N.; PANDEY, P. Wheatgrass: An Epitome of Nutritional Value. *Current Nutrition & Food Science*, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 22–30, 2021. ISSN: 15734013. DOI: <https://doi.org/10.2174/1573401317666210906140834>. Acesso em: 27 abr. 2024.

MISHRA, N. *et al.* Wheatgrass (*Triticum aestivum*): a miraculous microgreen: an overview. *Journal of Future FoodsKeAi Communications Co.*, 2025. (3) ISSN: 27725669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.07.003>.

MISHRA, N.; TRIPATHI, R.; DWIVEDI, M. DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF ANTIOXIDANT RICH WHEATGRASS CUPCAKE. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 126–138, 2020. ISSN: 2066-6845. DOI: <https://doi.org/10.34302/crpjfst/2020.12.3.10>. Disponível em: [http://chimie-biologie.ubm.ro/carpathian_journal/Papers_12\(3\)/CJFST12\(3\)2020_10.pdf](http://chimie-biologie.ubm.ro/carpathian_journal/Papers_12(3)/CJFST12(3)2020_10.pdf). Acesso em: 17 abr. 2024.

MOSHAWIH, S. *et al.* General Health Benefits and Pharmacological Activities of *Triticum aestivum* L. *Molecules* MDPI, 2022. (6) ISSN: 14203049. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27061948>.

NABI, B. G. *et al.* Natural pigments: Anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. *Food Bioscience*, [s. l.], v. 52, p. 102403, 2023. ISSN: 2212-4292. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2023.102403>. Acesso em: 20 maio. 2024.

NAGURA, F. Bandeja Microverdes Dupla Camada Germinação Broto. 2024. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2785981652-3-peças-bandeja-microverdes-dupla-camada-germinaco-broto-_JM?quantity=1. Acesso em: 1 abr. 2025.

NANDITA THAKUR. Chemical Composition, Minerals and Vitamins Analysis of Lyophilized Wheatgrass Juice Powder. *International Journal on Emerging Technologies*, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 1–8, 2019.

NAYAK, B.; LIU, R. H.; TANG, J. Effect of Processing on Phenolic Antioxidants of Fruits, Vegetables, and Grains—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, [s. l.], v. 55, n. 7, p. 887–918, 2015. ISSN: 1040-8398. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.654142>. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2011.654142>.

NIROULA, A. *et al.* Profile of chlorophylls and carotenoids of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) microgreens. *Journal of Food Science and Technology*, [s. l.], v. 56, n. 5, p. 2758–2763, 2019. ISSN: 0022-1155. DOI:

[https://doi.org/10.1007/s13197-019-03768-9.](https://doi.org/10.1007/s13197-019-03768-9) Disponível em:
[https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13197-019-03768-9.pdf.](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13197-019-03768-9.pdf) Acesso em: 2 jan. 2024.

OLIVEIRA, S. M.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review. *Food Engineering Reviews*, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 134–163, 2016. ISSN: 1866-7910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9124-0>. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12393-015-9124-0>.

ONYANGO OGUTU, F. *et al.* Wheat Grass: A Functional Food. [s. l.], v. 65, 2017. ISSN: 2225-0557. Disponível em: www.iiste.org.

ÖZKÖSE, A.; ARSLAN, D.; ACAR, A. The Comparison of the Chemical Composition, Sensory, Phenolic and Antioxidant Properties of Juices from Different Wheatgrass and Turfgrass Species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 499–507, 2016. ISSN: 1842-4309. DOI: <https://doi.org/10.15835/nbha44210405>.

PARDESHI, I. L.; BURBADE, R. G.; KHOD, R. N. Cost Effective Drying for High Quality Tender Wheatgrass Powder. *JOURNAL OF FOOD RESEARCH AND TECHNOLOGY*, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 1–10, 2013.

PATIL, N. L. *et al.* Exploration of wheatgrass as functional food by using urban agriculture models for regulating growth & nutrients. *South African Journal of Botany*, [s. l.], v. 151, p. 284–289, 2022. ISSN: 02546299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.02.032>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254629922000795>. Acesso em: 27 abr. 2024.

PÉREZ-GÁLVEZ, A.; VIERA, I.; ROCA, M. Carotenoids and Chlorophylls as Antioxidants. *Antioxidants*, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 505, 2020. ISSN: 2076-3921. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox9060505>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3921/9/6/505>.

PERYT, B.; SZYMCZYK, T.; LESCA, P. Mechanism of antimutagenicity of wheat sprout extracts. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, [s. l.], v. 269, n. 2, p. 201–215, 1992. ISSN: 00275107. DOI: [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(92\)90201-C](https://doi.org/10.1016/0027-5107(92)90201-C).

PUI, L. P.; SALEENA, L. A. K. Effects of spray-drying parameters on physicochemical properties of powdered fruits. *Foods and Raw Materials*, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 235–251, 2022. ISSN: 23109599. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-533>.

RAHMAN, R. *et al.* Effects of Wheat Grass Powder Incorporation on Physiochemical Properties of Muffins. *International Journal of Food Properties*, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 785–795, 2015. ISSN: 1094-2912. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.908389>.

RAMESH, M.; MUTHURAMAN, A. Flavoring and Coloring Agents: Health Risks and Potential Problems. In: *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes*. [s. l.], : Elsevier, 2018. p. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811518-3.00001-6>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128115183000016>.

ROLIM, S. G. *et al.* Total flavonoids quantification from O/W emulsion with extract of Brazilian plants. International Journal of Pharmaceutics, [s. l.], v. 308, n. 1–2, p. 107–114, 2006. ISSN: 0378-5173. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2005.10.031>. Acesso em: 20 maio. 2024.

ŞAHİN, F. *et al.* In Vitro Wound Healing Activity of Wheat-Derived Nanovesicles. Applied Biochemistry and Biotechnology, [s. l.], v. 188, n. 2, p. 381–394, 2019. ISSN: 0273-2289. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2913-1>.

SAVIC, I. M.; SAVIC GAJIC, I. M. Optimization of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from wheatgrass (*Triticum aestivum L.*). Journal of Food Science and Technology, [s. l.], v. 57, n. 8, p. 2809–2818, 2020. ISSN: 09758402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04312-w>.

SELOMULYA, C.; FANG, Y. Food powder rehydration. Handbook of Food Powders: Processes and Properties, [s. l.], p. 379–408, 2013. ISBN: 9780857098672. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098672.2.379>. Acesso em: 20 maio. 2024.

SEVERINI, C. *et al.* Influence of different blanching methods on colour, ascorbic acid and phenolics content of broccoli. Journal of Food Science and Technology, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 501–510, 2016. ISSN: 0022-1155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1878-0>.

SHARMA, N. *et al.* Evaluation of Anthocyanin Content, Antioxidant Potential and Antimicrobial Activity of Black, Purple and Blue Colored Wheat Flour and Wheat-Grass Juice against Common Human Pathogens. Molecules, [s. l.], v. 25, n. 24, p. 5785, 2020. ISSN: 1420-3049. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25245785>.

SHARMA, S. *et al.* Therapeutic potential of wheatgrass (*Triticum aestivum L.*) for the treatment of chronic diseases. *South Asian Journal of Experimental Biology*, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 308–313, 2013. ISSN: 2230-9799. DOI: [https://doi.org/10.38150/SAJEB.3\(6\).P308-313](https://doi.org/10.38150/SAJEB.3(6).P308-313). Disponível em: <https://sajeb.org/index.php/sajeb/article/view/143>. Acesso em: 8 maio. 2024.

SHARMA, V.; THAKUR, N.; DHALIWAL, H. S. Chemical Composition, Minerals and Vitamins Analysis of Lyophilized Wheatgrass Juice Powder. *International Journal on Emerging Technologies*, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 137–144, 2019. ISSN: 2249-3255. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340477392>.

SHEN, N. *et al.* Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, [s. l.], v. 383, p. 132531, 2022. ISSN: 0308-8146. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.132531>. Acesso em: 30 abr. 2024.

SILVA, N. C.; ANDRADE, G. B.; BARROZO, M. A. S. Spray-Dried Jaboticaba Powder as Food Resource. *Resources*, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 102, 2024. ISSN: 2079-9276. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources13080102>.

SINGH, H. P. Alternative research bibliometrics: It's about quality and not quantity. *Shoulder & Elbow*, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 121–122, 2022. ISSN: 1758-5732. DOI: <https://doi.org/10.1177/17585732211058453>.

SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. In: [S. l.: s. n.], . p. 152–178. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0076687999990171>.

SKOCZYLAS, Ł. *et al.* Evaluation of the quality of fresh and frozen wheatgrass juices depending on the time of grass harvest. *Journal of Food Processing and Preservation*, [s. l.], v. 42, n. 1, 2018. ISSN: 17454549. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.13401>.

SRIVASTAVA, S. *et al.* Encapsulation for efficient spray drying of fruit juices with bioactive retention. *Journal of Food Measurement and Characterization* Springer, 2022. (5) ISSN: 21934134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01481-4>.

STAMATOPOULOS, K. *et al.* Improvement of oleuropein extractability by optimising steam blanching process as pre-treatment of olive leaf extraction via response surface methodology. *Food Chemistry*, [s. l.], v. 133, n. 2, p. 344–351, 2012. ISSN: 03088146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.038>.

SUN, T.-Y.; LI, J.-S.; CHEN, C. Effects of blending wheatgrass juice on enhancing phenolic compounds and antioxidant activities of traditional kombucha beverage. *Journal of Food and Drug Analysis*, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 709–718, 2015. ISSN: 10219498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.01.009>.

TAMRAZ, M.; AL GHOSSAINI, N.; TEMRAZ, S. The Role of Wheatgrass in Colorectal Cancer: A Review of the Current Evidence. *International Journal of Molecular Sciences*, [s. l.], v. 25, n. 10, p. 5166, 2024. ISSN: 1422-0067. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25105166>.

TUCK, C. *et al.* Fermentable short chain carbohydrate (FODMAP) content of common plant-based foods and processed foods suitable for vegetarian- and vegan-based eating patterns. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, [s. l.], v. 31, n. 3, p.

422–435, 2018. ISSN: 1365277X. DOI: <https://doi.org/10.1111/JHN.12546>. Acesso em: 2 nov. 2024.

TULLO, A.; ABERA, S. Review on Nutrient Contents and Health Benefits of Wheatgrass Juice. International Journal of Smart Agriculture, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 32–39, 2023. ISSN: 2995-9829. DOI: <https://doi.org/10.54536/ijsa.v1i1.2193>.

VAN DEN DRIESSCHE, J. J.; PLAT, J.; MENSINK, R. P. Effects of superfoods on risk factors of metabolic syndrome: a systematic review of human intervention trials. Food & Function, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 1944–1966, 2018. ISSN: 2042-6496. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7FO01792H>. Disponível em: <https://xlink.rsc.org/?DOI=C7FO01792H>. Acesso em: 2 nov. 2024.

WAN, P. Advances in treatment of ulcerative colitis with herbs: From bench to bedside. World Journal of Gastroenterology, [s. l.], v. 20, n. 39, p. 14099, 2014. ISSN: 1007-9327. DOI: <https://doi.org/10.3748/wjg.v20.i39.14099>.

WANG, C. *et al.* Assessment of different blanching strategies on quality characteristics and bioactive constituents of *Toona sinensis*. LWT, [s. l.], v. 130, p. 109549, 2020. ISSN: 00236438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109549>.

WIGMORE, A. The Wheatgrass Book. 1. ed., [s. l.], : Avery Publishing Group, 1985. 1–144 p. ISBN: 13:978-0895292346.

XU, L. *et al.* Aquaponics Production of Wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) in Different Horticultural Substrates with African Catfish (*Clarias gariepinus*) in Northern Germany. AgriEngineering, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 1076–1094, 2022. ISSN: 26247402. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040067>.

YADAV, A.; SINGH, S.; YADAV, V. Screening herbal extracts as biostimulant to increase germination, plant growth and secondary metabolite production in wheatgrass. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 607, 2024. ISSN: 2045-2322. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50513-6>.

YANG, S.-J. *et al.* Effectiveness of Different Washing Strategies on Pesticide Residue Removal: The First Comparative Study on Leafy Vegetables. *Foods*, [s. l.], v. 11, n. 18, p. 2916, 2022. ISSN: 2304-8158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11182916>.

YOLMEH, M.; JAFARI, S. M. Applications of Response Surface Methodology in the Food Industry Processes. *Food and Bioprocess Technology*, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 413–433, 2017. ISSN: 1935-5130. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1855-2>. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11947-016-1855-2>.

YOUSEFI, S.; EMAM-DJOMEH, Z.; MOUSAVI, S. M. Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum L.*). *Journal of Food Science and Technology*, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 677–684, 2011. ISSN: 0022-1155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0195-x>.

ZAHOOR, I. *et al.* Recent applications of microwave technology as novel drying of food – Review. *Food and Humanity*, [s. l.], v. 1, p. 92–103, 2023. ISSN: 2949-8244. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOOHUM.2023.05.001>. Acesso em: 20 maio. 2024.

ZŁOTEK, U. *et al.* Effect of arachidonic and jasmonic acid elicitation on the content of phenolic compounds and antioxidant and anti-inflammatory properties of

wheatgrass (*Triticum aestivum* L.). *Food Chemistry*, [s. l.], v. 288, p. 256–261, 2019.
ISSN: 03088146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.124>.