



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JÉSSICA KELLY DA SILVA NEGREIROS

**AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA  
DO MELÃO DE SÃO CAETANO (*Momordica charantia* L.) PARA FINS  
TERAPÊUTICOS**

Recife

2024

JÉSSICA KELLY DA SILVA NEGREIROS

**AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA  
DO MELÃO DE SÃO CAETANO (*Momordica charantia* L.) PARA FINS  
TERAPÊUTICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito à obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

**Área de concentração:** Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

**Orientadores:** Prof. Maurício Alves da Motta Sobrinho

Profa. Josilene de A. Cavalcante

**Coorientador:** Prof. Nagel Alves Costa

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Negreiros, Jessica Kelly da Silva.

Avaliação e modelagem da secagem em camada de espuma do Melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.) para fins terapêuticos / Jessica Kelly da Silva Negreiros. - Recife, 2024.  
137f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, 2024.

Orientação: Maurício Alves da Motta Sobrinho.

Coorientação: Josilene de A. Cavalcante.

Inclui referências.

1. Difusividade; 2. Cinética de secagem; 3. Modelos matemáticos; 4. Fenólicos. I. Sobrinho, Maurício Alves da Motta. II. Cavalcante, Josilene de A. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JÉSSICA KELLY DA SILVA NEGREIROS

**AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DO  
MELÃO DE SÃO CAETANO (*MOMORDICA CHARANTIA* L.) PARA FINS  
TERAPÊUTICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado em: 21 / 08 / 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por Videoconferência

---

Prof. Dr. Deivson Cesar Silva Sales (Examinador Interno)  
Universidade de Pernambuco

Participação por Videoconferência

---

Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Participação por Videoconferência

---

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por Videoconferência

---

Prof. Dr. Osvaldo Soares da Silva (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Participação por Videoconferência

---

Profa. Dra. Tamires dos Santos Pereira (Examinadora Externa)  
Instituto Federal do Piauí

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por toda força e discernimento e por me permitir chegar até aqui.

A toda minha família por todo apoio e carinho, em especial a minha mãe Célia, ao meu irmão Jefferson, ao meu pai Antônio e a minha amada avó Maria.

Ao professor Maurício por ter me recebido de braços abertos, me apoiado fortemente e não me deixar desistir.

Aos professores Josilene e Nagel por todo carinho e cuidado ao longo de toda minha caminhada acadêmica, além de todo conhecimento que me foi passado, vocês foram fundamentais na minha trajetória, sou eternamente grata.

A Bárbara que sempre foi uma grande incentivadora, me apoiando em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

A Clediana, Rafael, Débora e Francisco por toda a ajuda nos laboratórios, por todo apoio e troca de experiência.

A todos os amigos que sempre me apoiam e incentivam, em especial a Felipe, Marcos, Paloma, Thailane e Yasmin.

A todos que contribuíram de alguma maneira para a realização desse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPE, pela oportunidade de dar continuidade à minha formação e aprofundamento do meu conhecimento, assim como à CAPES pelo financiamento de minha bolsa de doutorado.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime...”  
(Josué 1:9)

## RESUMO

O Melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.) é uma planta daninha, que é utilizada na gastronomia em algumas partes do mundo e que apresenta diversas atividades fitoterápicas comprovadas. Materiais agrícolas apresentam limitações no seu armazenamento devido à deterioração ocasionada por reações químicas e físicas, além da ação microbiológica. A secagem é um processo que visa a remoção do teor de água do material, dificultando assim as reações que causam sua deterioração. Entre as várias técnicas de secagem, a secagem em camada de espuma vem sendo muito estudada devido ao seu baixo custo e alta eficiência. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.), analisando a interferência das variáveis operacionais e ajustes matemáticos, visando determinar as melhores condições para o processo. Foi realizada a caracterização das espumas obtidas, através das análises de densidade, expansão, estabilidade e teor de água. A secagem das espumas ocorreu em estufa com circulação e renovação de ar até ser atingida a umidade de equilíbrio. As curvas de cinética e taxa de secagem foram obtidas a partir dos dados experimentais, sendo realizados ajustes nos modelos matemáticos para o ajuste a estes dados. As características dos pós obtidos foram avaliadas com as análises de teor de umidade, atividade de água, solubilidade em água, teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidante. De maneira geral, a temperatura de secagem foi a variável que mais afetou o processo, onde o aumento da temperatura ocasionou um aumento na taxa de secagem e no coeficiente de difusão, que aumentou de  $6,073 \times 10^{-10}$  à  $1,108 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, para a secagem das folhas, e de  $5,077 \times 10^{-10}$  à  $1,099 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, para a secagem dos frutos, com a elevação da temperatura de 50 para 70 °C, resultando em uma maior eficiência e velocidade do processo, que teve duração de 170 a 280 min, em geral. A secagem foi melhor representada pelos modelos de Page e Page modificado e foi caracterizada como um processo endotérmico e não espontâneo, evidenciado pelos valores positivos da entalpia ( $\Delta H$ ), que variou de 25,0613 a 32,9970 kJ/mol, e da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ), que variou de 133,5236 a 140,3367 kJ/mol. Os pós obtidos apresentaram teor de umidade menor do que 10,41% e atividade de água abaixo de 0,396, ficando dentro da faixa ideal para um armazenamento seguro. Os compostos bioquímicos dos materiais foram preservados durante o processo.

**Palavras-chave:** difusividade; cinética de secagem; modelos matemáticos; fenólicos.

## ABSTRACT

The *Momordica charantia* L. is a weed that is used in gastronomy in some parts of the world and that has several proven phytotherapeutic activities. Agricultural materials have limitations in their storage due to deterioration caused by chemical and physical reactions, in addition to microbiological action. Drying is a process that aims to remove moisture from the material, thus hindering the reactions that cause its deterioration. Among the various drying techniques, foam layer drying has been widely studied due to its low cost and high efficiency. In view of the above, this study aimed to evaluate the foam layer drying process of the leaves and fruits of the Melon of São Caetano (*Momordica charantia* L.), analyzing the interference of operational variables and mathematical adjustments, aiming to determine better conditions for the process. The characterization of the foams obtained was performed through the analyses of density, expansion, stability and humidity. The foams were dried in an oven with air circulation and renewal until the equilibrium humidity was reached. The kinetic and drying rate curves were obtained from the drying data, and mathematical adjustments were made to the experimental data. The characteristics of the powders obtained were evaluated by analyzing moisture content, water activity, water solubility, phenolic compound content, and antioxidant capacity. In general, the drying temperature was the variable that most affected the process, where the increase in temperature caused an increase in the drying rate and in the diffusion coefficient, which increased from  $6,073 \times 10^{-10}$  to  $1,108 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s for leaf drying, and from  $5,077 \times 10^{-10}$  to  $1,099 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s for fruit drying, with the increase in temperature from 50 to 70 °C, resulting in greater efficiency and speed of the process, which lasted from 170 to 280 min, in general. Drying was best represented by the Page and modified Page models and was characterized as an endothermic and non-spontaneous process, evidenced by the positive values of enthalpy ( $\Delta H$ ), which ranged from 25,0613 to 32,9970 kJ/mol, and Gibbs free energy ( $\Delta G$ ), which ranged from 133,5236 to 140,3367 kJ/mol. The powders obtained presented moisture content lower than 10,41% and water activity below 0,396, within the ideal range for safe storage. And the biochemical compounds of the materials were preserved during the process.

**Key word:** diffusivity; drying kinetics; mathematical models; medicinal plants

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Fluxograma simplificado das atividades desenvolvidas no estudo.....	39
<b>Figura 2</b> - Bandeja projetada para o processo de secagem: a) bandeja de fundo removível; b) espessura da bandeja; c) espuma disposta na bandeja; d) espessura da camada de espuma.....	45
<b>Figura 3</b> - Curva padrão de ácido gálico.....	50
<b>Figura 4</b> - Curva padrão do Trolox (DPPH).....	51
<b>Figura 5</b> - Curva padrão do Trolox (ABTS) .....	51
<b>Figura 6</b> - Diagrama de Pareto para a densidade aparente da espuma: (a) folhas; (b) frutos.....	55
<b>Figura 7</b> - Superfície de resposta para a densidade da espuma em função da concentração do agente espumante e do tempo de agitação: (a) folhas; (b) frutos.....	57
<b>Figura 8</b> - Diagrama de Pareto para a expansão da espuma: (a) folhas; (b) frutos.....	59
<b>Figura 9</b> - Superfície de resposta para a expansão da espuma em função da concentração do agente espumante e do tempo de agitação: (a) folhas; (b) frutos.....	61
<b>Figura 10</b> - Drenagem do líquido da espuma, ao decorrer do tempo, na temperatura de 50 °C para: (a) folhas; (b) frutos.....	63
<b>Figura 11</b> - Drenagem do líquido da espuma, ao decorrer do tempo, na temperatura de 70 °C para: (a) folhas; (b) frutos.....	63
<b>Figura 12</b> - Desprendimento de líquido da espuma, nas diferentes temperaturas, para as condições mínimas (3% de espumante e 4 min de agitação): (a) folhas; (b) frutos.....	65

<b>Figura 13</b> - Desprendimento de líquido da espuma, nas diferentes temperaturas, para as condições máximas (7% de espumante e 8 min de agitação): (a) folhas; (b) frutos.....	65
<b>Figura 14</b> - Diagrama de Pareto para os índices de estabilidade das espumas das diferentes partes do melão de São Caetano: (a) folhas; (b) frutos.....	66
<b>Figura 15</b> - Superfície de resposta para a estabilidade da espuma em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante para (a) folhas; (b) frutos.....	68
<b>Figura 16</b> - Diagrama de Pareto para o teor de água da espuma: (a) folhas; (b) frutos.....	70
<b>Figura 17</b> - Superfície de resposta para o teor de água da espuma em função da concentração do agente espumante e do tempo de agitação.....	71
<b>Figura 18</b> - Secagem da espuma das folhas de Melão de São Caetano: (a) espuma antes da secagem; (b) material seco após a secagem.....	72
<b>Figura 19</b> - Diagrama de Pareto para o tempo final de secagem: (a) folhas; (b) frutos.....	74
<b>Figura 20</b> - Superfície de resposta para o tempo de secagem em função da concentração do agente espumante e da temperatura de secagem: (a) folhas; (b) frutos.....	75
<b>Figura 21</b> - Diagrama de Pareto para a umidade de equilíbrio da secagem em camada de espuma: (a) folhas; (b) frutos.....	76
<b>Figura 22</b> - Superfície de resposta para a umidade de equilíbrio em função da concentração do agente espumante e da temperatura de secagem: (a) folhas; (b) frutos.....	77

<b>Figura 23</b> - Superfície de resposta para a umidade de equilíbrio em função do tempo de agitação e da temperatura de secagem: (a) folhas; (b) frutos.....	78
<b>Figura 24</b> - Curvas de cinética de secagem na temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	79
<b>Figura 25</b> - Curvas da taxa de secagem na temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	79
<b>Figura 26</b> - Curvas de cinética de secagem na temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	80
<b>Figura 27</b> - Curvas da taxa de secagem na temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	80
<b>Figura 28</b> - Curvas de cinética de secagem na temperatura de 70 °C: (a) folhas (b) frutos.....	81
<b>Figura 29</b> - Curvas de taxa de secagem na temperatura de 70 °C: (a) folhas (b) frutos.....	81
<b>Figura 30</b> - Comparativo das curvas de secagem nas condições mínimas de produção da espuma (3% agente espumante; 4min de agitação): (a) folhas (b) frutos.....	82
<b>Figura 31</b> - Comparativo das curvas de secagem nas condições máximas de produção da espuma (7% agente espumante; 8 min de agitação): (a) folhas (b) frutos.....	83
<b>Figura 32</b> - Ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais para temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	85
<b>Figura 33</b> - Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais para temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	86
<b>Figura 34</b> - Ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais para temperatura de 70 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	88

<b>Figura 35</b> - Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais para temperatura de 70 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	88
<b>Figura 36</b> - Ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais para temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	90
<b>Figura 37</b> - Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais para temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos.....	91
<b>Figura 38</b> - Coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura a partir da linearização da equação de Arrhenius para a secagem: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	94
<b>Figura 39</b> - Diagrama de Pareto para o teor de água do pó: (a) folhas; (b) frutos.....	99
<b>Figura 40</b> - Superfície de resposta para o teor de água do pó em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante: (a) pó das folhas; (b) pó dos frutos.....	100
<b>Figura 41</b> - Diagrama de Pareto para a atividade de água ( $a_w$ ) para o pó: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	102
<b>Figura 42</b> - Superfície de resposta para a atividade de água do pó em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	103
<b>Figura 43</b> - Diagrama de Pareto para a solubilidade em água para o pó: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	105
<b>Figura 44</b> - Superfície de resposta para a solubilidade em água do pó em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	106
<b>Figura 45</b> - Diagrama de Pareto para o teor de compostos fenólicos do pó: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	109

<b>Figura 46</b> - Superfície de resposta para o teor de compostos fenólicos do pó em função da temperatura de secagem e o tempo de agitação: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	110
<b>Figura 47</b> - Diagrama de Pareto para a capacidade antioxidante do radical DPPH do pó: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	113
<b>Figura 48</b> - Diagrama de Pareto para a capacidade antioxidante do radical ABTS do pó: (a) das folhas; (b) dos frutos.....	114
<b>Figura 49</b> - Curvas de TG, DTG e DTA para os pós das folhas do Melão de São Caetano: (a) liofilizado; (b) condições mínimas da secagem em camada de espuma; (c) condições máximas da secagem em camada de espuma.....	115
<b>Figura 50</b> - Curvas de TG, DTG e DTA para os pós das folhas do Melão de São Caetano: (a) liofilizado; (b) condições mínimas da secagem em camada de espuma; (c) condições máximas da secagem em camada de espuma.....	117

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 -</b>	Composição nutricional aproximada dos frutos maduros de <i>Momordica charantia</i> L.....	23
<b>Tabela 2 -</b>	Variáveis independentes e seus respectivos níveis do processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do melão de São Caetano.....	41
<b>Tabela 3 -</b>	Planejamento experimental completo para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.....	42
<b>Tabela 4 -</b>	Planejamento experimental completo utilizado para a produção da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.....	42
<b>Tabela 5 -</b>	Modelos matemáticos utilizados para realizar os ajustes aos dados experimentais de secagem.....	46
<b>Tabela 6 -</b>	Resultados obtidos para a densidade aparente da espuma do suco do melão de São Caetano.....	54
<b>Tabela 7 -</b>	Resultados obtidos para a análise de expansão da espuma das folhas e dos frutos do melão de São Caetano.....	58
<b>Tabela 8 -</b>	Índices de estabilidade da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano obtidos nas diferentes condições do planejamento experimental.....	62
<b>Tabela 9 -</b>	Resultados obtidos para a análise de teor de água da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.....	69
<b>Tabela 10 -</b>	Tempo final de secagem e umidade de equilíbrio das diferentes condições do planejamento experimental da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.....	73

<b>Tabela 11 -</b>	Ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano à 50 °C.....	84
<b>Tabela 12 -</b>	Equações dos modelos ajustados aos dados das cinéticas de secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano para a temperatura de 50 °C.....	86
<b>Tabela 13 -</b>	Ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano a 70 °C.....	87
<b>Tabela 14 -</b>	Equações dos modelos que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos para os dados das cinéticas de secagem das folhas e frutos do Melão de São Caetano para a temperatura de 70 °C.....	89
<b>Tabela 15 -</b>	Ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano à 60 °C.....	90
<b>Tabela 16 -</b>	Equações dos modelos que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos para a secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano na temperatura de 60 °C.....	91
<b>Tabela 17 -</b>	Coefficientes de difusão efetivos para a secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano.....	93
<b>Tabela 18 -</b>	Equação de Arrhenius linearizada para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.....	94
<b>Tabela 19 -</b>	Energia de ativação e propriedades termodinâmicas para a secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano.....	95

<b>Tabela 20</b> - Resultados da análise de teor de água do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano.....	98
<b>Tabela 21</b> - Resultados da análise de atividade de água (aw) do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano.....	101
<b>Tabela 22</b> - Resultados obtidos da análise de solubilidade em água do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano.....	104
<b>Tabela 23</b> - Resultados obtidos para as análises de teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidantes do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, obtidos por liofilização.....	107
<b>Tabela 24</b> - Resultados obtidos da análise do teor de compostos fenólicos dos pós das folhas e frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma.....	107
<b>Tabela 25</b> - Resultados obtidos da análise da capacidade antioxidante, para os radicais DPPH e ABTS, dos pós das folhas e frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma.....	111

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS.....	21
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	MELÃO DE SÃO CAETANO ( <i>Momordica charantia</i> L.).....	22
<b>2.1.1.</b>	<b>Propriedades do Melão de São Caetano.....</b>	<b>24</b>
2.2	SECAGEM.....	25
<b>2.2.1.</b>	<b>Cinética e ajustes dos modelos matemáticos do processo de secagem.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Mecanismo de migração da água e propriedades termodinâmicas da secagem.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.3.</b>	<b>Secagem em camada de espuma.....</b>	<b>31</b>
2.3	ESPUMA.....	34
<b>2.3.1.</b>	<b>Agentes espumantes/estabilizantes.....</b>	<b>35</b>
2.4	USO DE PLANTAS MEDICINAIS.....	36
2.5	SECAGEM DO MELÃO DE SÃO CAETANO ( <i>Momordica charantia</i> L.) .....	37
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
3.1	PREPARO DA MATÉRIA PRIMA, PRODUÇÃO DO COMPOSTO/SUCO E DA ESPUMA.....	40
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	41
3.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESPUMA.....	43

3.3.1.	Densidade aparente da espuma.....	43
3.3.2.	Expansão da espuma.....	43
3.3.3.	Estabilidade da espuma.....	44
3.3.4.	Teor de água .....	44
3.4	SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA.....	44
3.4.1.	Cinética e Taxa de Secagem.....	45
3.4.2.	Ajustes matemáticos aos dados experimentais.....	46
3.4.3.	Cálculo dos coeficientes de difusão efetivos e das propriedades termodinâmicas.....	46
3.5	SECAGEM POR LIOFILIZAÇÃO.....	48
3.6	CARACTERÍSTICAS DOS PÓS OBTIDOS.....	48
3.6.1.	Atividade de água.....	48
3.6.2.	Teor de água .....	48
3.6.3.	Solubilidade em água.....	49
3.6.4.	Obtenção do extrato.....	49
3.6.5.	Compostos fenólicos.....	49
3.6.6.	Atividade sequestrante do radical DPPH (2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazil).....	50
3.6.7.	Atividade sequestrante do radical ABTS (2,2-azino bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)).....	51
3.6.8.	Análises térmicas.....	52
3.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53

4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA.....	53
4.1.1.	Densidade aparente da espuma.....	53
4.1.2.	Expansão da espuma.....	57
4.1.3.	Estabilidade da espuma.....	61
4.1.4.	Teor de água .....	68
4.2	SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA.....	72
4.2.1.	Tempo de secagem e umidade de equilíbrio.....	72
4.2.2.	Cinética e taxa de secagem.....	79
4.3	AJUSTES MATEMÁTICOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	84
4.4	COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.....	92
4.5	CARACTERÍSTICAS DO PÓ OBTIDO.....	97
4.5.1.	Teor de água.....	97
4.5.2.	Atividade de água (aw).....	101
4.5.3.	Solubilidade em água.....	104
4.5.4.	Compostos fenólicos e capacidade antioxidante.....	106
4.5.5.	Análises térmicas.....	114
5.	CONCLUSÃO.....	119
	REFERÊNCIAS.....	121

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de recursos provenientes da natureza, como minerais, plantas e animais, para fins terapêuticos é tão antiga quanto à humanidade, sendo empregada por diferentes vertentes da medicina tradicional, como a fitoterapia, para o tratamento da saúde. Entre eles, o reino vegetal tem uma maior contribuição na descoberta e desenvolvimento de novos fármacos (Brasil, 2012). Com a demanda pela utilização de plantas medicinais na cura ou prevenção de doenças, o cultivo e/ou extrativismo dessas plantas torna-se uma alternativa cada vez mais importante no tratamento de várias doenças (Rates, 2001).

O Melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.) é uma planta daninha, que é frequentemente encontrada em pomares, cafezais, cercas e terrenos baldios (Assis *et al.*, 2015). Os extratos de diferentes partes desta planta têm sido muito utilizados em pesquisas científicas, onde já foi comprovada sua eficácia no tratamento de inúmeras doenças e patologias, entre eles, o mais estudado é o tratamento de Diabetes *Mellitus* (Nepomoceno; Pietrobon, 2018). Entre as atividades já comprovadas do Melão de São Caetano, encontram-se: antiulcerogênica, antibacteriana, imunossupressora, anti-inflamatória, abortiva, anti-hipertensiva, anticancerígena (Tan *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009), antileucêmico, antiviral, citotóxico, entre outras (Voidaleski *et al.*, 2015).

Essa planta também apresenta características importantes para a agronomia, como: atividade antifúngica (Celoto *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2016) e inseticida (Jesus; Mendonça; Moreira, 2013; Adesina, 2013; Liu *et al.*, 2015; Santos; Silva, 2015;). Além de ser utilizada na gastronomia em saladas frescas, sucos, secas, salteadas e fritas (Kim *et al.*, 2023).

Em geral, os produtos agrícolas não possuem um tempo de vida útil extenso, devido a ação dos microrganismos e das reações químicas e enzimáticas que deterioram o material, impedindo o seu armazenamento por longos períodos. Portanto, torna-se importante, além do aperfeiçoamento de práticas agrícolas, o desenvolvimento de técnicas eficientes de conservação do material para que o mesmo possa ser armazenado de forma segura e que a biomassa e as propriedades das plantas possam ser aproveitadas de forma integral e efetiva (Tabaldi *et al.*, 2012; Martins *et al.*, 2015).

A secagem é a técnica de conservação mais utilizada na pós-colheita (Khan; Bakht, 2019) e que objetiva um armazenamento seguro do material, podendo assim, suprir as necessidades das indústrias alimentícias e farmacêuticas (Martins *et al.*, 2015).

Entre as várias técnicas existentes, a secagem em camada de espuma vem sendo muito estudada, principalmente em alimentos, por ser um método que reduz o tempo de secagem e por obter produtos com propriedades desejáveis. Além disso, essa técnica permite o processamento de materiais difíceis de secar por outros métodos e possibilita uma maior retenção de voláteis, já que é utilizada uma temperatura inferior do que as utilizadas nas demais técnicas (Kudra; Ratti, 2006).

## 1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo geral avaliar o processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.) através da análise das características do processo e do pó obtido.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir um planejamento experimental fatorial coerente para o processo;
- Caracterizar as espumas obtidas através das análises de densidade, expansão, estabilidade e teor de água, seguindo o planejamento fatorial;
- Avaliar as curvas de cinética e taxa de secagem, obtidas com os dados da secagem em camada de espuma;
- Realizar os ajustes matemáticos dos dados experimentais do processo;
- Calcular os coeficientes de difusão efetivos, assim como as propriedades termodinâmicas do processo;
- Analisar, estatisticamente, a influência das variáveis independentes sobre as características da espuma, sobre o tempo de secagem e umidade de equilíbrio;
- Analisar as características dos pós obtidos através das análises de teor de água, atividade de água, solubilidade em água, teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidante, verificando, estatisticamente, a influência das variáveis operacionais sobre essas características;
- Obter o pó das folhas e dos frutos por liofilização;
- Comparar o teor de compostos bioquímicos (fenólicos totais e capacidade antioxidante) nos pós obtidos por secagem em camada de espuma com os pós obtidos por liofilização visando a validação da técnica.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os fundamentos dos processos empregados neste estudo, finalizando com uma revisão de técnicas de secagem já empregadas para a matéria prima estudada.

### 2.1 MELÃO DE SÃO CAETANO (*Momordica charantia* L.)

A *Momordica charantia* L. é uma espécie que pertence à família Cucurbitaceae, que teve sua origem no leste da Índia e sul da China. É uma planta trepadeira que possui flores amarelas isoladas (Robinson; Decker-Walters, 1997).

No Brasil essa espécie possui vários nomes populares, entre eles: Melão de São Caetano, fruta de cobra, momórdica, erva de São Vicente e melãozinho (Robinson; Decker-Walters, 1997). Ela é muito encontrada em terrenos abandonados do sul ao nordeste do Brasil (Maia *et al.*, 2008).

O fruto do melão de São Caetano é verde quando imaturo e de tonalidade alaranjada quando maduro. Ele é parecido com um pepino pequeno com textura espinhosa (Grover; Yadav, 2004). O interior do fruto é oco, com uma fina camada de polpa e com uma cavidade central cheia de sementes. Muitas vezes, os frutos são consumidos quando ainda estão verdes ou apenas começando a ficar amarelos, pois nessa fase ele possui uma textura crocante e aquosa. Ao decorrer do amadurecimento, a casca vai endurecendo e aumentando o sabor amargo e, quando é atingido o total amadurecimento, os frutos ficam com tonalidade laranja, moles e, geralmente, dividem-se em segmentos, expondo as sementes (Kwatra *et al.*, 2016).

Seu caule é do tipo herbáceo fino e se caracteriza pela presença de gavinhas simples e pubescentes. As suas folhas são de consistência membranácea, com cinco ou sete lobos sinuados, mucronados, dentados e opacos (Jorge; Sakuma; Inomata, 1992).

No melão de São Caetano são encontrados ácidos graxos insaturados, aminoácidos, minerais e vitaminas (Yuwai *et al.*, 1991). Na Tabela 1 é possível verificar a composição nutricional dos frutos maduros de *Momordica charantia* L.

**Tabela 1** - Composição nutricional aproximada dos frutos maduros de *Momordica charantia* L.

Elementos	Quantidade (em 100 g do fruto maduro)
Água	83,0 a 92,0 g
Lipídios	0,2 a 1,0 g
Proteínas	1,5 a 2,0 g
Carboidratos	4,0 a 10,5 g
Fibras	0,8 a 1,7 g
Energia	105,0 a 250,0 kJ
Ferro	1,8 a 2,0 mg
Cálcio	20,0 a 23,0 mg
Fósforo	38,0 a 70,0 mg
Vitamina C	88,0 a 96,0 mg

Fonte: Adaptado de CEI-RD (2007)

Vários estudos foram realizados com a finalidade de identificar os compostos químicos dessa planta, com isso, já foram identificados e isolados setenta triterpenos do tipo cucubitano do fruto, sementes, raízes e folhas (Okabe *et al.*, 1980; Miyahara; Okabe; Yamauchi *et al.*, 1981; Yasuda *et al.*, 1984; Begum *et al.*, 1997; Murakami *et al.* 2001; Chang *et al.*, 2006; Harinantenaina *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2010; Cheng; Kuo; Liao, 2012).

Nessa planta é encontrada uma série de compostos químicos, entre eles vitaminas e minerais nutricionalmente importantes, antioxidantes e muitos outros fitoquímicos, que incluem: saponinas, compostos fenólicos, glicosídeos, óleos, alcalóides, resinas, açúcares redutores e ácidos livres, além disso, sua polpa madura é uma das melhores fontes de carotenóide licopeno (Pahlavani *et al.*, 2019; Kwatra *et al.*, 2016).

O efeito mais estudado dessa planta é o antidiabético e hipoglicêmico, além destes, ela possui outros fatores farmacológicos e funções medicinais, que incluem antibacteriano, antioxidante, anti-inflamatório, antiviral e propriedades protetoras do fígado (Bakare *et al.*, 2010; Joseph; Jini, 2013; Mun; Joung; Kim, 2013; Gushiken *et al.*, 2016; Jia *et al.*, 2017; Thent; Das; Zaidun, 2018).

Os componentes ativos da *Momordica charantia* L. ainda não foram totalmente identificados, mas é conhecido que seus componentes antidiabéticos incluem polipeptídeos, glicosídeos, esteróis e alcalóides (vicina) (Tan *et al.*, 2008).

### 2.1.1. Propriedades do Melão de São Caetano

Os estudos com o Melão de São Caetano mais encontrados na literatura têm a finalidade de caracterizar os seus constituintes e avaliar suas ações medicinais.

Os efeitos antidiabéticos e hipoglicêmicos são os mais explorados nos estudos, como o de Bhat *et al.* (2018), que investigaram os efeitos do extrato aquoso dos frutos de Melão de São Caetano, administrado de forma oral, na glicemia, no glicogênio tecidual, hemoglobina glicosilada, insulina e GLP-1 em ratos Wistar diabéticos. Os resultados foram promissores e os autores sugerem o uso do extrato aquoso de *Momordica charantia* L. para a ação hipoglicêmica no tratamento do diabetes.

Kulkarni, Lohidasan e Mahadik (2019), além de analisarem a atividade antidiabética *in vitro*, também investigaram a atividade antioxidante dos fitoconstituintes dos frutos de Melão de São Caetano. Os resultados mostraram que esses frutos possuem um poderoso efeito antidiabético e antioxidante, assim, os autores concluíram que essa planta possui uma grande chance de aplicação industrial.

A atividade antioxidante do Melão de São Caetano também foi investigada por Maneenin *et al.* (2018), desta vez, do extrato de sua polpa e casca. Os autores também avaliaram seu efeito protetor contra danos testicular em ratos induzidos por ácido valpróico (VPA). Com os resultados obtidos os autores sugerem que o extrato de *Momordica charantia* L. possui atividade antioxidante para diferentes radicais e que ele pode proteger os danos testiculares, evitando as reduções da concentração de espermatozóides, do nível de testosterona e das proteínas testiculares essenciais em ratos induzidos por VPA.

Yoshime *et al.* (2018) avaliaram as composições fitoquímicas e as atividades antioxidantes *in vitro* de óleos prensados a frio obtidos das sementes de romã (*Punica granatum* L.) e Melão de São Caetano. Com os resultados os autores concluíram que os óleos estudados são fontes importantes e alternativas de ácidos graxos poliinsaturados. Neles foram encontrados importantes teores de ácido  $\alpha$ -linolênico conjugado, além de fitoesteróis (principalmente  $\beta$ -sitosterol) e tocoferóis (principalmente  $\gamma$ -tocoferol) e todas as amostras estudadas apresentaram atividades antioxidantes.

Park *et al.* (2019) exploram o efeito do extrato metanólico de Melão de São Caetano na proteção da pele, examinando seus efeitos antioxidante e citoprotetor, hidratação, e atividades antipigmentação em queratinócitos HaCaT, Fibroblastos NIH3T3 e melanócitos B16F10. Além disso, investigaram o mecanismo de atividade protetora da

pele nessas células, mediada pelo extrato de Melão de São Caetano. Com o conjunto de resultados obtidos os autores concluíram que o extrato metanólico de Melão de São Caetano desempenha um papel protetor contra vários tipos de estresses prejudiciais à pele e sugerem potencial aplicação em preparação cosmecêutica.

Devido à riqueza dos fitoconstituintes do Melão de São Caetano, alguns pesquisadores estudam sua possível ação contra alguns tipos de câncer, como no trabalho de Rao (2018), que demonstrou os potenciais benefícios do extrato do Melão de São Caetano na prevenção e no atraso da progressão do câncer da via oral. Em conclusão, o autor propôs a eficácia anticâncer do extrato na prevenção do câncer de boca, também indicando que os resultados demonstraram que o extrato pode ser eficaz para o tratamento de outros tipos de câncer.

Uma vez explanada as características e aplicabilidades do Melão de São Caetano, serão abordadas as fundamentações sobre a secagem, operação utilizada, detalhando seus princípios e finalidades, além de explorar as técnicas utilizadas, dando ênfase para a secagem em camada de espuma, uma vez que foi a técnica escolhida para o presente trabalho.

## 2.2 SECAGEM

A operação de secagem tem como finalidade remover ou reduzir a água, ou qualquer outro líquido, presente em um material. Ela é muito utilizada para garantir a qualidade de materiais in natura e sua estabilidade durante o armazenamento, pois a diminuição do teor de água reduz a atividade biológica e as reações físicas e químicas que podem ocorrer (Nascimento; Biagi; Oliveira, 2015; Oliveira *et al.*, 2015).

A conservação do material acontece devido aos microrganismos e as enzimas necessitarem de água para suas atividades. A diminuição da água disponível reduz a velocidade das reações químicas e o desenvolvimento dos microrganismos, fornecendo ao produto uma maior vida de prateleira (Oliveira *et al.*, 2015; Amit *et al.*, 2017). Além de aumentar a vida útil dos produtos vegetais, a secagem reduz a massa e volume destes materiais, facilitando o seu transporte e armazenamento (Nascimento; Biagi; Oliveira, 2015; Corrêa *et al.*, 2019).

A retirada da água ocorre pela movimentação da água entre o material e o ar que o envolve. Essa movimentação ocorre devido à diferença de pressão de vapor d'água na

superfície do sólido e do ar ao seu redor. Para que o material seja submetido ao processo de secagem é necessário que a pressão de vapor sobre a sua superfície seja maior do que a pressão de vapor no ar de secagem (Silva, 2008).

No processo de secagem ocorrem dois fenômenos simultâneos: a transferência de calor e de massa. A transferência de calor ocorre devido a necessidade de um fornecimento de calor para evaporar a água do material, enquanto que o vapor formado é arrastado pela transferência de massa (Park *et al.*, 2014).

A secagem de um sólido utilizando uma corrente de ar ocorre com o contato direto sólido-ar, onde esse ar possui uma temperatura superior a do sólido, resultando em gradiente de temperatura e, conseqüentemente, em um estado de não equilíbrio (Silva, 2008; Park *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015).

Devido a esse não equilíbrio, ocorre a transferência de calor, onde o sólido é aquecido e o líquido presente é evaporado. Por conta da diferença de pressão de vapor, ocorre a transferência de massa, que acontece até a pressão de vapor do sólido ser igual à pressão parcial de vapor no ar, que é quando o sistema atinge o equilíbrio e a secagem é encerrada (Silva, 2008; Park *et al.*, 2014).

De forma geral, a secagem pode ser natural ou artificial. A secagem natural ocorre com a exposição do material ao sol, sem nenhuma fonte artificial de calor e sem nenhum equipamento para manipulação. Este tipo de processo é bastante econômico, já que não necessita de energia para operação de equipamentos, porém, o processo nesta condição é mais lento e necessita de grandes áreas para exposição do material, dependendo totalmente das condições climáticas do lugar onde será realizado o processo (Silva, 2008).

Na secagem artificial há o uso de equipamentos para a produção do calor. Neste processo é possível ter o controle da temperatura, do teor de água e da corrente de ar, tornando-o mais rápido e confiável, porém, possui um custo com energia, equipamentos e suas instalações (Silva, 2008).

Em algumas técnicas artificiais de secagem são encontrados os equipamentos que usam convecção de ar quente para a remoção da água da superfície do material. Trata-se de uma técnica simples e muito utilizada para a secagem de materiais sólidos como fatias de frutas, grãos, entre outros. Como exemplo desta técnica destacam-se os secadores de bandeja, estufas com circulação de ar e os secadores do tipo túnel (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019).

Para a secagem de materiais líquidos ou pastosos a técnica mais utilizada industrialmente é a atomização. Ela consiste na pulverização do material em uma corrente

de ar quente que flui rapidamente. Este é um processo com uso intensivo de energia, devido à necessidade de fornecer calor específico para uma evaporação em pouco tempo, o que aumenta o seu custo (Hardy; Jideani, 2015).

Existem técnicas que visam uma maior conservação dos constituintes presentes no material, como a secagem por liofilização (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019). Na liofilização o material é congelado e posteriormente colocado sob vácuo, onde ocorre a sublimação do líquido presente, ou seja, o gelo é transformado em vapor sem passar pelo descongelamento (Hardy; Jideani, 2015). Por utilizar baixas temperaturas, essa técnica consegue minimizar a degradação dos nutrientes termicamente sensíveis, no entanto, trata-se de um processo lento e com alto custo energético (Hardy; Jideani, 2015; Mujumdar; Law, 2010).

Também existem métodos modernos que fazem o uso de micro-ondas, radiofrequência, fluidização, vácuo ou combinações entre diferentes técnicas de secagem (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019).

No Quadro 1 é exposto as principais técnicas de secagem com suas principais vantagens e desvantagens.

**Quadro 1** – Vantagens e desvantagens das técnicas de secagem

<b>Técnica de secagem</b>	<b>Princípio</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Secagem natural	Uso da energia solar e do vento para promover a secagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Fácil operação;</li> <li>- Renovável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longo período de secagem</li> <li>- Necessidade de grandes áreas para processamento de grande quantidade de materiais;</li> <li>- Dependência das condições climáticas;</li> <li>- Possíveis ocorrências de pragas e microrganismos.</li> </ul>
Secagem por micro-ondas	Utilizado o aquecimento através de radiação eletromagnética	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rápida secagem;</li> <li>- Economia energética.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não uniformidade de aquecimento dentro do produto.</li> </ul>
Liofilização	O material é congelado e posteriormente colocado sob vácuo, onde ocorre a sublimação do líquido presente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de baixas temperaturas;</li> <li>- Maior conservação de compostos devido ao uso de baixa temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto custo de implementação e manutenção;</li> <li>- Alto custo energético;</li> <li>- Longo período de secagem.</li> </ul>
Secagem em leito fixo	O material fica estático e a secagem ocorre através da passagem do ar aquecido através dele.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Configuração simples;</li> <li>- Baixo custo de implementação;</li> <li>- Versatilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pode acarretar perdas de compostos bioativos;</li> <li>- Pode demandar longo período de tempo para total remoção da água do material.</li> </ul>
Secagem em camada de espuma	Ocorrer a formação de uma espuma com o material líquido ou semilíquido que é submetida a secagem.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilidade do uso de baixas temperaturas;</li> <li>- Conservação dos compostos sensíveis ao calor;</li> <li>- Redução do tempo de secagem devido a maior exposição da área superficial ao ar de secagem;</li> <li>- Baixo custo operacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de utilizar um agente espumante.</li> </ul>
Secagem por atomização	Ocorre pela atomização do líquido em um compartimento que recebe um fluxo de ar quente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Curto tempo de operação;</li> <li>- Conservação das propriedades físico-químicas do material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto custo de implementação e manutenção;</li> <li>- Alto custo energético;</li> <li>- Necessidade de utilizar agentes carreadores.</li> </ul>

(Silva *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2019; Hardy; Jideani, 2015)

### 2.2.1 Cinética e ajustes dos modelos matemáticos do processo de secagem

As curvas de secagem fornecem importantes informações, que são fundamentais para o dimensionamento de equipamentos e desenvolvimento e otimização de processos, tornando possível estimar o tempo de secagem de determinado material e, com isso, determinar o gasto energético, que refletirá no custo do processo (Alexandre *et al.*, 2013).

O estudo da cinética de secagem visa conhecer o comportamento do material durante o processo, sendo controlada pelas características do material que será seco, pela temperatura, velocidade e o teor de água do ar de secagem (Celestino, 2010).

De acordo com Kee (1992) podem ser utilizados dois métodos para a obtenção das curvas de secagem. O primeiro é o monitoramento da perda de água do material mediante pesagem direta da amostra. O segundo é através do monitoramento do teor de água do gás de secagem, na entrada e saída do secador, utilizando instrumentos como psicrômetros e higrômetros de infravermelho.

No início do processo de secagem, a temperatura do material entra em contato com o ar de aquecimento e tende a se ajustar, atingindo o estado estacionário, iniciando o período de taxa constante. Nessa etapa, a superfície do sólido está saturada de água e a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido. A água do interior do sólido substitui a água retirada da superfície, mantendo a taxa constante. O mecanismo de migração da massa de água varia de acordo com o tipo de sólido. Esse período acaba quando o sólido atinge a umidade crítica, onde o teor de umidade é insuficiente para manter a superfície úmida (Strumillo; Kudra 1986).

Quando é atingida a umidade crítica se inicia a etapa onde a velocidade de migração de água do interior do produto até sua superfície é menor do que a velocidade de água retirada da superfície do produto através do ar de secagem. Inicia-se então o período de secagem decrescente, onde a temperatura do sólido aumenta à proporção que a taxa de secagem decresce gradativamente. A velocidade de remoção de umidade nessa etapa é inferior a dos demais períodos, pois a superfície do sólido vai se empobrecendo em umidade (Strumillo; Kudra 1986).

O segundo período de taxa decrescente é aquele onde a evaporação ocorre a partir do interior do sólido até que a secagem seja encerrada. Ao fim dessa etapa a taxa de secagem tende a zero e a umidade aproxima-se da umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio de um produto é definida como sendo o menor teor de umidade atingível, nas

condições em que é submetida a secagem, sendo atingida quando a pressão de vapor no sólido se iguala à pressão parcial de vapor no ar de secagem (Strumillo; Kudra 1986).

Para descrever o processo de secagem existem os modelos matemáticos teóricos, os semiteóricos e os empíricos. Os modelos teóricos consideram que as transferências de calor e massa ocorrem tanto no interior do material, como na interface entre o material e o ar de secagem. Os modelos semiteóricos, geralmente, são derivados da segunda lei de Fick ou de modelos simplificados, que consideram a temperatura, a umidade relativa, velocidade do ar e teor de umidade, assim como os modelos empíricos (Araujo *et al.*, 2017b; Santos *et al.*, 2019a).

No Quadro 2 estão expostos os modelos mais utilizados na literatura para prever o processo de secagem em camada delgada.

**Quadro 2** - Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem

Nome do Modelo	Modelo
Newton	$RU = \exp(-kt)$
Page	$RU = \exp(-kt^n)$
Page Modificado*	$RU = a \exp(-kt^n)$
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-kt)$
Dois termos	$RU = a \exp \exp(-kt) + b \exp(-nt)$
Aproximação de difusão	$RU = a \exp \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Midilli, Kucuk e Yapar	$RU = a \exp \exp(-kt^n) + bt$
Wang e Singh	$RU = 1 + (at) + (bt^2)$
Logarítmico	$RU = a \exp \exp(-kt) + c$

*t* - tempo de secagem (min); *k*- coeficiente de secagem; *a*, *n* e *b*- parâmetros dos modelos; RU - Razão de Umidade =  $X/X_0$

\*Modificado por Manguiera (2020)

Fonte: Adaptado de Franco (2015)

### 2.2.2 Mecanismo de migração da água e propriedades termodinâmicas da secagem

Para que a água do material seja evaporada na superfície é necessário que ela seja transportada do seu interior. Os principais mecanismos que descrevem essa migração da água do interior à superfície do material são: difusão líquida, difusão de vapor e o escoamento de líquido e de vapor (Park *et al.*, 2014).

Na difusão líquida o transporte ocorre devido à existência do gradiente de concentração. Na difusão de vapor o transporte acontece pelo gradiente de pressão de vapor, que é causado pelo gradiente de temperatura. Já os escoamentos de líquido e de

vapor ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e de alta temperatura (Park *et al.*, 2014).

A difusividade é um modelo teórico aplicado ao processo de secagem que considera como mecanismo principal a difusão, sendo baseado na segunda Lei de Fick, que expressa o fluxo de massa por unidade de área proporcional ao gradiente de concentração de água e o parâmetro de proporcionalidade é o coeficiente de difusão (Araújo *et al.*, 2017; Oliveira; Oliveira; Park, 2006).

Os efeitos de todos os fenômenos que interferem na migração da água são representados pelo coeficiente de difusão, cujo valor é obtido através de ajustes de dados experimentais. Assim, entende-se como difusividade a facilidade com que a água é removida do material (Reis *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2018). Essa difusividade não é intrínseca ao material, uma vez que ela varia com as condições de secagem, por isso, denomina-se de difusividade efetiva (Oliveira; Oliveira; Park, 2006).

Com o cálculo da difusividade é possível determinar as principais propriedades termodinâmicas do processo de secagem, como a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Essas propriedades trazem importantes informações para o projeto de equipamentos, para o cálculo da energia requerida no processo e para estudo dos fenômenos físicos que acontecem na superfície do material (Corrêa *et al.*, 2010).

A variação de entalpia disponibiliza uma medida na alteração de energia que ocorre entre as moléculas de água e os constituintes do material durante o processo de sorção. A entropia está associada com as forças de atração ou repulsão no sistema, sendo relacionada ao arranjo espacial do sistema, com isso, ela estabelece o grau de ordem ou desordem que existe no sistema (McMinn; Al-Muhtaseb; Magge, 2005).

A energia livre de Gibbs disponibiliza informações sobre a espontaneidade do processo, para qual os valores negativos indicam um processo espontâneo e os valores positivos os processos não espontâneos (Araújo *et al.*, 2017b).

### **2.2.3 Secagem em camada de espuma**

A técnica de secagem em camada de espuma é um processo onde o material líquido ou semilíquido é transformado em uma espuma estável, através da incorporação ar ou outro gás, que é submetido à secagem com ar aquecido (Ratti; Kudra, 2006).

De acordo com Qadri, Srivastava e Yousuf (2019), no geral, o processo de secagem em camada de espuma se divide em quatro etapas, sendo a primeira a preparação

da matéria-prima, onde o material é transformado em líquido ou pasta. As frutas, legumes ou vegetais são descascados, é removido o caroço ou/e despolidos, para a obtenção do suco ou purê. Os sucos obtidos podem, ainda, serem concentrados antes de prosseguir no processo. A etapa de preparação da matéria-prima vai depender da finalidade desejada para o produto final, podendo ser utilizadas diferentes partes, do mesmo material para a secagem.

A segunda etapa é a formação da espuma. A matéria-prima que já for líquida ou pastosa inicia o processo diretamente dessa etapa (Febrianto; Kumalaningsih; Aswari 2012). O suco ou purê é misturado ao agente espumante e/ou estabilizante e submetido à agitação. A agitação mecânica é a técnica mais comum utilizada para o processamento de alimentos, porém, a geração da espuma também pode acontecer por borbulhamento de ar (Hardy; Jideani, 2015). Os materiais que já possuem alta capacidade espumante não necessitam de aditivos (Mangueira *et al.*, 2020).

A terceira etapa é a secagem da espuma formada, que consiste em formar finas camadas da espuma e submetê-las à evaporação da água. Comumente, a secagem da espuma é realizada por convecção, na qual o ar quente flui através ou sobre a fina camada, geralmente com espessura de 0,003-0,01 m (Ratti; Kudra, 2006). A área de contato do ar com o material é aumentada devido aos poros da espuma, facilitando a remoção da água. Além da convecção, a transferência de calor também pode ocorrer por condução e radiação, ou pela combinação entre ambas.

Entre os equipamentos e técnicas mais utilizados para secagem das espumas estão a estufa com circulação de ar (Rigueto *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2020; Ayetigbo *et al.*, 2019), o secador de bandejas (Tavares *et al.*, 2020; Khodifad; Kumar, 2020; Benkovic *et al.* 2019; Tavares *et al.*, 2019; Buljat *et al.*, 2019) e a liofilização (Seerangurayar *et al.*, 2017); a secagem em micro-ondas (Koç; Elmas; Varhan, 2019) também é utilizada, assim com combinações entre as técnicas (Ozcelik *et al.*, 2020; Ozcelik *et al.*, 2019).

A quarta e última etapa é o tratamento e armazenamento do pó obtido, que vai depender da finalidade desejada para o material, podendo ser triturado ou moído para reduzir a sua granulometria (Hamzeh *et al.*, 2019; Varhan; Elmas; Koç, 2019; Tan; Sulaiman, 2019). O peneiramento também é utilizado, para garantir o tamanho desejado e uniformidade do material, porém, muitas vezes, nenhuma operação é necessária, sendo o pó apenas armazenado de forma adequada, de modo que evite o ganho de umidade e garanta a estabilidade dos seus constituintes ao longo do tempo.

A umidade e atividade de água do pó são parâmetros importantes para garantir a estabilidade do produto durante o armazenamento, por isso é fundamental mantê-los o mais baixo possível. Alimentos com teor de umidade abaixo de 10% e atividade de água menor do que 0,6 são considerados microbiologicamente estáveis durante o armazenamento, já que a maioria dos microrganismos não se desenvolve abaixo deste valor (Paiva *et al.*, 2023; Salahi; Mohebbi; Taghizadeh, 2017). Grande parte das enzimas é inativada em produtos com atividade de água abaixo de 0,85 (Hamzeh *et al.*, 2019). Com isso, se a secagem for eficiente, mantendo a umidade e atividade de água do produto dentro da faixa segura, onde as atividades enzimáticas e a ação dos microrganismos sejam inibidas, o produto é considerado seguro para ser armazenado em temperatura ambiente, tornando dispensável o congelamento.

Uma das principais vantagens da técnica de secagem em camada de espuma é o aumento da taxa de secagem, quando comparado aos materiais não espumados, ocasionado pela formação de uma grande área superficial na interface gás-líquido, o que promove uma maior movimentação interna de umidade (Kadam; Balasubramanian, 2011).

A utilização de temperaturas mais baixas e os curtos tempos de secagem, também são vantagens ocasionadas pela maior área de superfície exposta ao ar quente, provocada pela formação de espuma, o que aumenta a velocidade de secagem, acelerando o processo de remoção de água (Kudra; Ratti, 2008).

Essas vantagens foram observadas por Djaeni *et al.* (2018) ao secarem, em secador de bandejas, o extrato de Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) em camadas de espuma e não espumada. A taxa de secagem do material espumado foi, em média, três vezes maior do que a do material não espumado, resultando em um tempo de secagem três vezes menor.

Além dessas vantagens, essa técnica possibilita o processamento de materiais difíceis de secar, a obtenção de produtos com propriedades desejadas, retém compostos voláteis que em outros métodos seriam perdidos durante o processo, além de ser considerada uma técnica relativamente simples e barata (Kudra; Ratti, 2006).

A principal desvantagem dessa técnica é a necessidade de utilizar aditivos que podem modificar as características do material, já que muitos materiais não conseguem produzir a espuma necessária apenas com a agitação e, nestes casos, faz-se necessária a adição de agentes espumantes e/ou emulsificantes (Marques; Arruda; Silva, 2016).

Devido à fácil implantação e grande capacidade de conservar os componentes do material, a técnica de secagem em camada de espuma vem sendo muito utilizada em

alimentos, tais como: tomate (Purbasari; Ardhyansyah, 2024), beterraba (Omidi *et al.*, 2024), banana (Watharkar *et al.*, 2021), jambolão (Tavares *et al.*, 2020), jambo (Rigueto *et al.*, 2020), framboesa (Ozcelik *et al.*, 2020), polpa de maçã (Khodifad; Kumar, 2020), suco de uva (Tavares *et al.*, 2019), polpa de acerola (Coelho *et al.*, 2019), iogurte (Miskiyah *et al.*, 2019), suco de limão (Dehghannya *et al.*, 2019), entre outros.

### 2.3. ESPUMA

A espuma é de uma dispersão de gás em um líquido. As duas fases são separadas por uma fina camada chamada de fase lamelar (Hardy; Jideani, 2015). Existem cerca de  $10^3$  bolhas por mL de espuma, cuja emulsão tem o número médio de  $10^{11}$  gotículas. Os tamanhos médios das bolhas podem variar entre 0,1 e 3 mm (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019).

Devido à alta energia interfacial, as espumas são termodinamicamente instáveis. Elas podem ser classificadas em dois tipos, de acordo com sua instabilidade: o primeiro é chamado de espuma instável ou transitória, cuja vida útil dura segundos, enquanto que o segundo é chamado de espumas permanentes, cuja vida útil dura horas ou dias. O colapso da espuma acontece devido a junção de bolhas, formando uma bolha maior. Esse processo inicia com a aproximação das bolhas, onde é formado um filme fino, o filme é drenado e por fim ocorre sua ruptura (Hardy; Jideani, 2015). O uso de alguns agentes espumantes ou estabilizantes podem prolongar a vida útil da espuma, tornando-a mais estável.

As características da espuma afetam o processo de secagem, influenciando a sua eficiência, assim como a qualidade do produto obtido. A capacidade de expansão, estabilidade, assim como a estrutura da espuma são importantes para a circulação de ar no material durante a secagem. A espuma deve se manter mecânica e termodinamicamente estável, pois o seu colapso acarreta a desestruturação celular tornando ineficiente a remoção da água da superfície e reduz a qualidade do produto final obtido (Bag; Srivastav; Mishra, 2011).

A densidade da espuma é outra propriedade importante, pois exerce uma grande influência na sua estabilidade. Densidades mais baixas ocasionam uma maior estabilidade da espuma e facilitam a remoção de água durante a operação, permitindo a aplicação de temperaturas mais baixas durante a secagem (Kudra; Ratti, 2006). A densidade também está relacionada com a capacidade de incorporação de ar no sistema, indicando que

quanto menor a densidade, maior a fração de ar presente na espuma (Falade; Adeyanju; Uzo-Petters, 2003).

A expansão da espuma facilita a movimentação da água durante o processo, pois as bolhas de ar, durante o processo de formação da espuma, são separadas por lâminas de água, que evaporam durante a secagem. Essa expansão da espuma está relacionada com o volume de ar introduzido na solução durante o seu processo de produção (Marinova *et al.*, 2011).

### **2.3.1. Agentes espumantes/estabilizantes**

Muitos materiais não possuem propriedades espumantes e, portanto, não formam uma espuma suficientemente estável para o processo de secagem, independentemente do tipo e tempo de agitação. Para obter a espuma desses materiais se faz necessário a utilização de aditivos, sendo eles os agentes espumantes e os estabilizantes (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019). A espuma estável pode ser obtida utilizando apenas o agente espumante ou por uma combinação entre espumantes e estabilizantes.

Os agentes espumantes atuam reduzindo a tensão superficial entre as interfaces. Eles são considerados eficazes quando formam um filme forte, viscoelástico e coeso, capaz de suportar temperaturas e agitações mecânicas (Sangamithra *et al.*, 2014).

As proteínas podem agir como um bom agente espumante, proporcionando a estabilidade necessária para a espuma. É desejável que, tanto a proteína quanto qualquer outro agente espumante, seja eficiente em baixas concentrações e que funcione na presença de outros constituintes que possam afetar a formação da espuma (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019).

Os estabilizadores de espuma atuam atrasando o colapso das bolhas, permitindo que ela mantenha sua estrutura por mais tempo. Os polímeros são muito utilizados como estabilizadores devido à sua capacidade de aumentar a viscosidade da solução, reduzindo a velocidade de drenagem da lamela (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2019).

Uma vez explanada as técnicas de secagem e detalhados e parâmetros e aditivos da secagem em espuma, será apresentada a fundamentação da legislação para plantas medicinais, seguida de um estado da arte sobre secagem da *Momordica charantia* L.

## 2.4 USO DE PLANTAS MEDICINAIS

A prática de utilizar produtos naturais para fins medicinais é muito antiga. Indícios mostram que plantas medicinais e tóxicas eram utilizadas nas civilizações mais antigas, sendo considerada uma das práticas mais remotas do homem para cura, prevenção e tratamento de doenças (Batista; Valença, 2012). Na pré-história o homem já aprendeu a distinguir os tipos de plantas que eram capazes de diminuir ou sanar suas enfermidades, esses conhecimentos foram transmitidos ao longo das gerações e aprimorados com novos experimentos (Newall; Anderson; Phillipson, 2002).

De acordo com Oshiro *et al.* (2016), no Brasil, a prática de utilizar plantas medicinais é descendente dos índios, que teve influência da cultura africana e portuguesa. No Brasil, a comercialização e registro de fitoterápicos são regulados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA).

A ANVISA define um fitoterápico como:

Produto obtido de matéria-prima ativa vegetal, exceto substâncias isoladas, com finalidade profilática, curativa ou paliativa, incluindo medicamento fitoterápico e produto tradicional fitoterápico, podendo ser simples, quando o ativo é proveniente de uma única espécie vegetal medicinal, ou composto, quando o ativo é proveniente de mais de uma espécie vegetal (Brasil, 2017).

Também são considerados fitoterápicos, segundo a Resolução RDC nº 10/2010, as plantas medicinais ou suas partes, que contenham as substâncias, ou classes de substâncias responsáveis pela ação terapêutica, após o processo de coleta ou colheita, estabilização e secagem, íntegras, rasuradas, trituradas ou pulverizadas (Brasil, 2010).

Na lista criada pela ANVISA, chamada de Denominação Comum Brasileira (DCB), são listados, com nome oficial, todos os fármacos e/ou princípios ativos aprovados para uso no Brasil, na qual é possível encontrar o registro da *Momordica charantia* L. (Brasil, 2017), mostrando a viabilidade dessa planta na fitoterapia.

## 2.5 SECAGEM DO MELÃO DE SÃO CAETANO (*Momordica charantia* L.)

Na literatura é possível encontrar algumas técnicas de secagem para partes do Melão de São Caetano, como no estudo de Kim *et al.*, (2023), que realizaram a secagem dos frutos do Melão de São Caetano com a finalidade de analisar a influência do tratamento térmico e do estágio de maturação sobre as atividades antioxidantes, coloração e clorofilas dos frutos. Para isto, cortaram os frutos transversalmente, em uma espessura de 1 cm e submeteram a secagem, usando uma máquina de secagem (Koencon Co., Ltd., Hanam, República da Coreia), até que o teor de água fosse <10% a 30, 60 e 90 °C. As amostras secas foram pulverizadas usando um misturador comercial e peneiradas. Com os resultados obtidos, os autores concluíram que houve um aumento das atividades antioxidantes com o aumento da temperatura de secagem, independentemente do estágio de maturidade da fruta e que o tratamento térmico levou a alterações de cor em diferentes estágios de maturidade do fruto, em que a mudança de verde para amarelo em frutas esverdeadas foi causada pela degradação de clorofilas.

Nguyen *et al.* (2020) utilizaram uma combinação de secagem convectiva de baixa temperatura e radiação de micro-ondas para secar fatias do fruto do Melão de São Caetano. O ar seco utilizado passou por um desumidificador personalizado e então por dois aquecedores elétricos para atingir a temperatura necessária antes de entrar na câmara de secagem. As potências do micro-ondas utilizadas foram de 1,5, 3,0 e 4,5 W/g. As temperaturas do ar de secagem foram de 20, 25 e 30 °C e as velocidades do ar foram de 1,0, 1,2 e 1,4 m/s. Os resultados indicaram que todas as variáveis estudadas afetaram significativamente a remoção de umidade do material. A potência do micro-ondas e a temperatura do ar de secagem apresentaram efeitos significativos na retenção de compostos bioativos e na capacidade antioxidante.

Youn, Park e Yoon (2019) realizaram diferentes tipos de secagem do fruto do Melão de São Caetano e analisaram as características dos pós obtidos. Os frutos foram fatiados, mantendo a espessura de 1 cm e submetido aos processos: secagem ao sol, secagem com ar quente, secagem por infravermelho e por liofilização. Após a secagem, os pós foram moídos, usando um moedor, e análises físico-químicas foram realizadas. Nos resultados obtidos observou-se que o maior teor de polifenóis foi encontrado na amostra seca com ar quente e a atividade antioxidante dos pós secos com ar quente e infravermelho foi significativamente maior do que nos outros métodos.

No trabalho de Lv *et al.* (2019) o objetivo foi estudar a secagem de fatias do fruto de Melão de São Caetano através de um dispositivo vibratório de secagem por micro-ondas com e sem fluidização, desenvolvido pela equipe, analisando diferentes processos de pré-tratamento (branqueamento de água fervente, ultrassom e vapor superaquecido) na qualidade da secagem do material. Com os resultados os autores observaram que a combinação do micro-ondas e leito fluidizado melhorou a uniformidade da secagem. Também observaram que o uso de pré-tratamentos ocasionou a redução no tempo de secagem, que foi de 100 min para a secagem sem pré-tratamento, de 90 min para a secagem com pré-tratamento ultrassônico e de 80 min para a secagem com branqueamento com água fervente e com vapor superaquecido. O uso do pré-tratamento ultrassônico alterou a cor do material, enquanto o uso de branqueamento com água fervente e vapor superaquecido preservaram mais a cor do material.

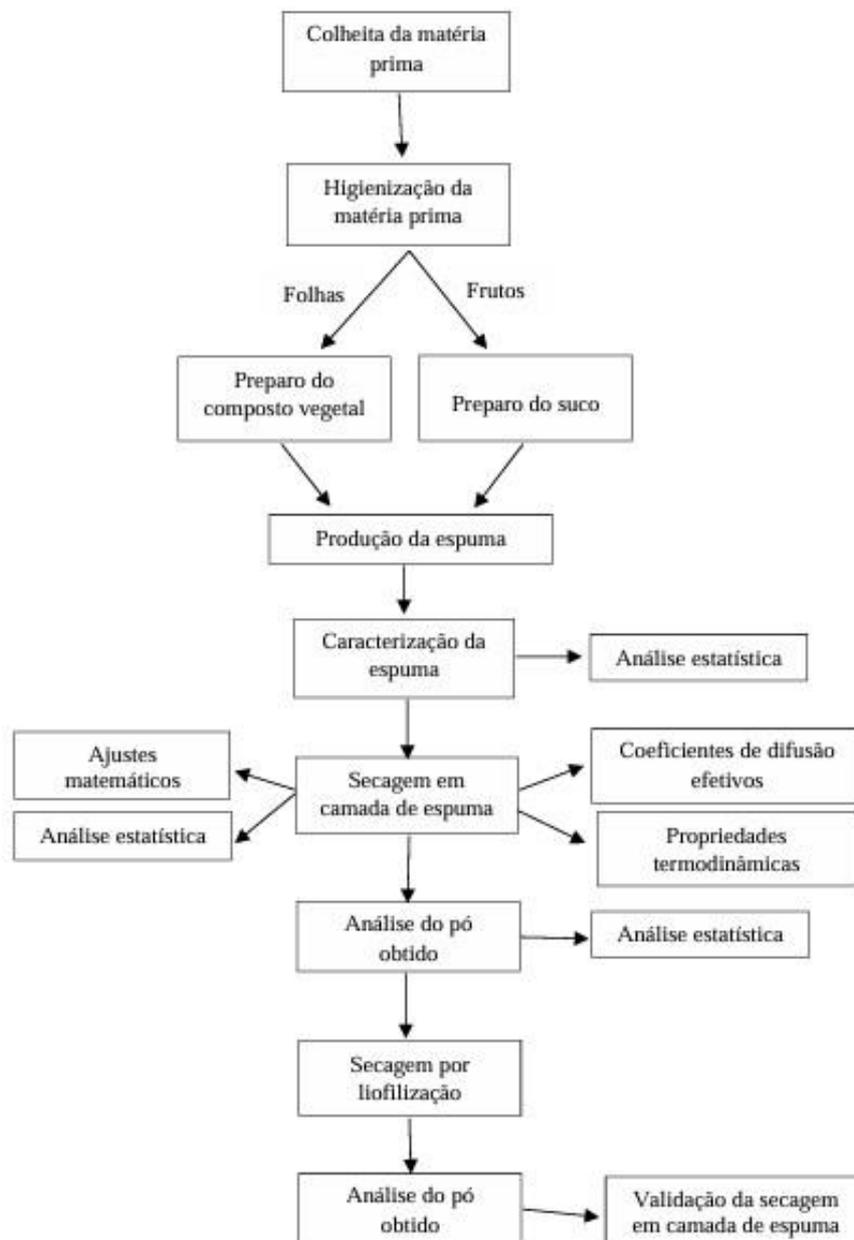
Yan *et al.* (2019) compararam os efeitos de três diferentes métodos de secagem na qualidade do produto e dos polissacarídeos bioativos dos frutos do Melão de São Caetano. As técnicas de secagem avaliadas foram: secagem em camada delgada por ar quente, utilizando um forno termostático elétrico; liofilização e secagem por radiação infravermelha. Foi analisado a aparência, cor, reidratação e microestrutura dos pós obtidos, além de diferentes polissacarídeos solúveis em água. Os autores concluíram que a secagem por liofilização forneceu um produto com maior qualidade, levando em consideração a aparência, cor, taxa de reidratação e microestrutura. Levando em consideração os componentes bioativos, os pós secos por radiação infravermelho apresentaram maiores teores.

A ação medicinal do Melão de São Caetano é a mais explorada nos estudos encontrados na literatura, porém, percebe-se que os pesquisadores, muitas vezes, precisam processar a matéria prima antes de obter o extrato utilizado na pesquisa. Como nos estudos de Bhat *et al.* (2018) que para obter o extrato utilizado na pesquisa, os autores secaram o fruto em estufa e trituraram em moinho. Park *et al.* (2019) também secaram as folhas do Melão de São Caetano em estufa, a 60 °C por 24 h e trituraram em moedor mecânico para obter o extrato metanólico.

### 3. METODOLOGIA

Na Figura 1 é possível observar o fluxograma simplificado das atividades desenvolvidas durante o estudo. Cada etapa encontra-se detalhada nos tópicos seguintes.

**Figura 1** – Fluxograma simplificado das atividades desenvolvidas no estudo



Fonte: A autora (2024)

### 3.1 PREPARO DA MATÉRIA PRIMA, PRODUÇÃO DO COMPOSTO/SUCO E DA ESPUMA

As folhas e frutos do Melão de São Caetano utilizados na pesquisa foram provenientes da horta de plantas medicinais da Universidade Federal da Paraíba, localizada na cidade de João Pessoa/PB (-7.155163 de latitude e -34.792344 de longitude). As matérias primas foram colhidas de forma manual, onde já eram selecionados os materiais livres de defeitos e de acordo com o padrão de maturação, para os frutos, sendo analisado visualmente pela cor, considerando o fruto maduro com coloração totalmente alaranjada.

Após a colheita, as matérias primas foram levadas para o Laboratório de Termodinâmica do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. As mesmas foram higienizadas seguindo as recomendações da Resolução RDC nº 216/2004 (Brasil, 2004), ou seja, foram lavadas com água potável e em seguida mergulhadas em uma solução clorada (200 ppm de hipoclorito de sódio) por 10 min. Após o tempo determinado, foram novamente lavadas para a retirada do cloro. Por fim, o excesso de água foi retirado com papel toalha e os materiais prosseguiram para o processo de produção do composto/suco.

Para as folhas, a produção do composto foi dividida em duas etapas, a primeira consistiu em reduzir o volume das folhas passando as mesmas em um multiprocessador doméstico da marca Philco, modelo Maxxi de 800 W de potência, por 1 min, sendo adicionados cerca de 50 g de folhas por vez. Após o processamento, o composto homogêneo das folhas foi obtido adicionando água e as folhas, na proporção de 1:1, em liquidificador industrial de alta rotação, da marca Metvisa, com capacidade de 2 L e velocidade constante de 1800 rpm, por 1 min.

Para a produção do suco dos frutos do Melão de São Caetano, os frutos e a água foram adicionados, na proporção de 1:1, em liquidificador de alta rotação industrial da marca Metvisa, com capacidade de 2 L e velocidade constante de 1800 rpm durante 1 min.

Para a produção da espuma, o composto das folhas e o suco dos frutos do Melão de São Caetano produzidos foram misturados ao agente espumante e as misturas foram submetidas à agitação mecânica, em batedeira planetária da marca Arno (modelo Deluxe SX71), com o nível máximo de agitação (680 rpm). O agente espumante utilizado foi o Portogel® (DU PORTO INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA LTDA), um emulsificante para

fins alimentícios, à base de água, propileno glicol e emulsificantes (monoglicerídeos destilados, éster de poliglicerol e estearato de potássio).

### 3.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foi definido um planejamento experimental fatorial completo,  $2^3$  e 3 pontos centrais, com o objetivo de analisar a influência das variáveis independentes: concentração do agente espumante, tempo de agitação em batedeira e temperatura de secagem, sobre as variáveis de resposta, que são: tempo final de secagem, umidade de equilíbrio e as características do pó obtido (avaliado a partir da sua umidade) atividade de água, solubilidade em água, teor de compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante (para o radical DPPH e ABTS).

Nas Tabelas 2 e 3 são mostradas, respectivamente, as variáveis independentes para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano e seus respectivos níveis e a matriz do planejamento experimental fatorial completo, com suas várias combinações.

**Tabela 2** - Variáveis independentes e seus respectivos níveis do processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do melão de São Caetano

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
Concentração do agente espumante (%)	3	5	7
Tempo de agitação (min)	4	6	8
Temperatura de secagem (°C)	50	60	70

Fonte: A autora (2024)

**Tabela 3** – Matriz do planejamento experimental completo para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano

<b>Experimento</b>	<b>Cesp (%)</b>	<b>tag (min)</b>	<b>T (°C)</b>
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)

Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura

Fonte: A autora (2024)

A temperatura de secagem não interfere no processo de formação da espuma, portanto, para analisar as características da espuma, foi definido um planejamento experimental  $2^2$  e 3 pontos centrais, totalizando 7 experimentos, utilizando as mesmas variáveis e níveis já citados (Tabela 2), com exceção da temperatura de secagem, tendo como resposta a densidade, expansão e umidade da espuma. A matriz do planejamento experimental fatorial completo utilizado para analisar essas características da espuma pode ser observada na Tabela 4. A estabilidade foi a única característica da espuma analisada considerando também a temperatura de secagem (Tabela 3).

**Tabela 4** - Planejamento experimental completo utilizado para a produção da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano

<b>Experimento</b>	<b>Cesp (%)</b>	<b>tag (min)</b>
1	3 (-1)	4 (-1)
2	7 (1)	4 (-1)
3	3 (-1)	8 (1)
4	7 (1)	8 (1)
5	5 (0)	6 (0)
6	5 (0)	6 (0)
7	5 (0)	6 (0)

Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação

Fonte: A autora (2024)

Os níveis de concentração do agente espumante assim como do tempo de agitação foram definidos mediante testes preliminares. A faixa de temperatura escolhida foi a que comumente é utilizada em matérias vegetais, visando a maior conservação de seus constituintes.

As variáveis independentes escolhidas são as mais comumente estudadas para o processo de secagem em camada de espuma, visto que, a formação da espuma depende do agente espumante e, conseqüentemente, de sua concentração, assim como do tempo de agitação. Para a secagem, a temperatura é fundamental, uma vez que essa variável é a força motriz para a transferência de calor, um dos fenômenos presentes nessa operação. Essas variáveis também foram estudadas na secagem em camada de espuma da folha da graviroleira (Oliveira *et al.* 2020); da popa de maçã (Khodifad; Kumar, 2020); do cacau com extrato de hortelã-pimenta (Benkovic *et al.* 2019) e da polpa de acerola (Coelho *et al.*, 2019).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESPUMA

#### 3.3.1 Densidade aparente da espuma

Para a determinação da densidade aparente das espumas obtidas, as amostras foram colocadas em uma proveta de 100 mL e, ao preencher totalmente o seu volume, o sistema foi pesado, em balança semi-analítica, da marca Shimadzu modelo BL3200H. Então a densidade foi calculada com a relação massa e volume da espuma.

#### 3.3.2 Expansão da espuma

O volume da espuma formada está relacionado diretamente com a capacidade de incorporação de ar da solução. Para determinar a expansão da espuma foi avaliado o volume do material antes e depois de ser submetido à agitação. E a porcentagem de expansão foi calculada pela Equação 1 (Pereira *et al.*, 2017):

$$(\%)\text{expansão} = \frac{V_f - V_i}{V_i} \cdot 100\% \quad (1)$$

Na qual:  $V_i$ = Volume inicial do líquido (mL);  $V_f$ = Volume da espuma formada após a agitação (mL).

### 3.3.3 Estabilidade da espuma

A estabilidade da espuma é inversamente proporcional ao volume de líquido desprendido da mesma. Para analisar essa estabilidade foi montado um sistema com provetas, funis e telas de nylon, onde foram adicionados 120 mL da espuma e a cada 10 min foi verificado o volume drenado na proveta, durante 90 min (Pereira *et al.*, 2017). O índice de estabilidade da espuma foi calculado utilizando a Equação 2.

$$\text{Índice de estabilidade} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2)$$

Na qual:  $\Delta V$  = variação entre o volume inicial e o volume de líquido drenado (mL);  $V_0$  = volume inicial (mL)

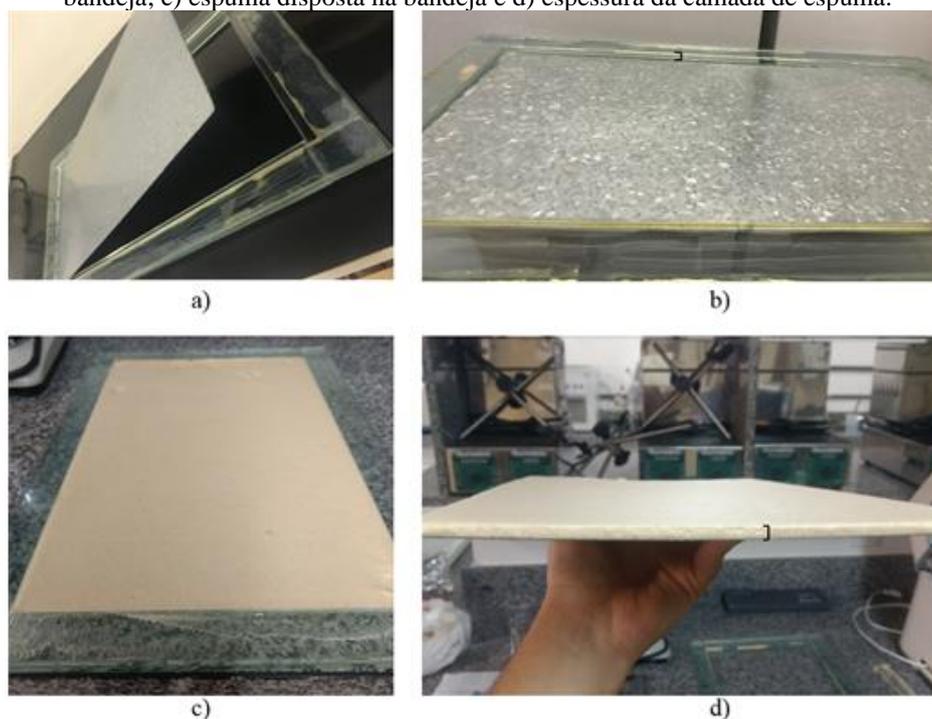
### 3.3.4 Teor de água

O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico (IAL, 2008), no qual 1 g da amostra foi pesada, em cápsula de alumínio e levada à estufa a 105 °C e deixada por 24 horas. Após o tempo determinado, o teor de água foi calculado pela diferença de massa no início e fim da análise.

## 3.4 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

Para realizar o processo de secagem, a espuma foi disposta em uma bandeja de aço inoxidável, com 1 mm de espessura, sem bordas laterais e com o fundo removível, com 36 cm de comprimento e 25 cm de largura, como pode ser observado na Figura 2. A mesma foi previamente tarada e encaminhada para uma estufa com circulação e renovação de ar (da marca Solab modelo SL102). O peso da bandeja com a espuma foi determinado em intervalos de tempo pré-estabelecidos, para acompanhar a remoção de água do material durante o processo. O mesmo foi considerado encerrado quando não houve mais variação da massa. A espessura da camada de espuma foi mantida fixa em 0,5 cm e a temperatura da estufa utilizada variou, seguindo as condições do planejamento experimental.

**Figura 2** - Bandeja projetada para o processo de secagem: a) bandeja de fundo removível; b) espessura da bandeja; c) espuma disposta na bandeja e d) espessura da camada de espuma.



Fonte: Negreiros *et al.* (2019)

### 3.4.1 Cinética e Taxa de Secagem

Com os dados obtidos durante o processo de perda de umidade da espuma na secagem foi obtida a razão de umidade adimensional (RU), determinada pela Equação 3:

$$RU = \frac{X_{bs}}{X_{bs0}} \quad (3)$$

Na qual: RU = umidade adimensional;  $X_{bs}$  = umidade em base seca;  $X_{bs0}$  = umidade em base seca inicial.

A umidade em base seca foi determinada pela razão entre a água eliminada e a massa seca presente na amostra, de acordo com a Equação 4:

$$X_{bs} = \frac{(m_i - m_f)}{m_{ss}} \quad (4)$$

Na qual:  $X_{bs}$  = umidade em base seca;  $m_i$  = massa inicial da amostra (g);  $m_f$  = massa final (g);  $m_{ss}$  = massa de sólidos secos da amostra (g).

A taxa de secagem relaciona as derivadas da umidade em base seca com o tempo com a razão da massa de sólidos secos do material e a área de secagem, como é mostrado na Equação 5:

$$W = -\frac{m_{ss}}{A} * \frac{dX_{bs}}{dt} \quad (5)$$

Na qual:  $W$  = taxa de secagem;  $m_{ss}$  = massa de sólidos secos da amostra (g);  $A$  = área de secagem (cm<sup>2</sup>);  $X_{bs}$  = umidade em base seca;  $t$  = tempo (min).

Com os valores calculados foram construídas as curvas de cinética de secagem (RU versus tempo) e de taxa de secagem ( $W$  versus  $X_{bs}$ ).

### 3.4.2 Ajustes matemáticos aos dados experimentais

Para o ajuste matemático das curvas de secagem foram utilizados os dados experimentais obtidos durante os experimentos e as equações dos modelos matemáticos mostrados na Tabela 5. Foram realizadas análises de regressão não linear, pelo método de Gauss-Newton, para conjuntos de experimentos, agrupados de acordo com a temperatura de secagem, utilizando o software Statistica® da Statsoft e os ajustes dos modelos foram testados por meio de comparação dos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o erro padrão da estimativa ( $S$ ).

**Tabela 5** - Modelos matemáticos utilizados para realizar os ajustes aos dados experimentais de secagem

Nome do Modelo	Modelo
Newton	$RU = \exp(-kt)$
Page	$RU = \exp(-kt^n)$
Page Modificado*	$RU = a \exp(-kt^n)$
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-kt)$
Midilli, Kucuk e Yapar	$RU = a \exp \exp(-kt^n) + bt$

$t$  - tempo de secagem (min);  $k$  - coeficiente de secagem;  $a$ ,  $n$  e  $b$  - parâmetros dos modelos; RU - Razão de Umidade =  $X/X_0$

\*Modificado por Manguiera (2020)

Fonte: Adaptado de Franco (2015)

### 3.4.3 Cálculo dos coeficientes de difusão efetivos e das propriedades termodinâmicas

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste matemático da difusão líquida, através da segunda Lei de Fick (Equação 6).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (6)$$

A solução proposta por Crank (1975), considerando uma placa plana, que a difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) é constante ao longo do tempo, que no início do processo a umidade do produto é uniformemente distribuída, que o encolhimento do produto durante a secagem é desprezível e que a remoção de água é unidirecional (Equação 7):

$$\frac{X_{bs} - X_{eq}}{X_{b0} - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} * \exp \left[ -D_{ef} * (2n + 1)^2 * \pi^2 * \frac{t}{4L^2} \right] \quad (7)$$

Na qual:  $X_{eq}$  = teor de umidade no equilíbrio;  $X_{b0}$  = teor de umidade inicial;  $L = \frac{1}{2}$  da espessura total da placa submetida à secagem (m);  $t$  = tempo de secagem (s).

A estimativa do coeficiente de difusão foi realizada através de regressão não-linear, utilizando o método de Gauss-Newton.

A relação entre os coeficientes de difusão efetivos e as temperaturas de secagem foi dada por um ajuste da equação de Arrhenius, de acordo com a Equação 8 (Silva *et al.*, 2016):

$$D_{ef} = D_0 * \exp \left( -\frac{E_a}{R*(T+273,15)} \right) \quad (8)$$

Na qual:

$D_0$  = fator pré-exponencial ( $m^2/s$ );

$E_a$  = energia de ativação ( $J/mol$ );

$R$  = constante universal dos gases ( $8,314 J/mol K$ );

$T$  = temperatura ( $^{\circ}C$ ).

Para obter os parâmetros da equação de Arrhenius foi feita uma linearização da Equação 8, obtendo assim a Equação 9 (Santos *et al.*, 2019a):

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \frac{1}{(T+273,15)} \quad (9)$$

As propriedades termodinâmicas foram determinadas pelo método descrito pela constante universal dos gases (Silva *et al.*, 2016). Foi realizado o cálculo da entalpia, da entropia e da energia livre de Gibbs (Equações 10, 11 e 12 respectivamente) para o processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.

$$\Delta H = E_a - R * (T + 273,15) \quad (10)$$

$$\Delta S = R * \left[ \ln (D_0) - \ln \left( \frac{k_B}{h_p} \right) - \ln (T + 273,15) \right] \quad (11)$$

$$\Delta G = \Delta H - (T + 273,15) * \Delta S \quad (12)$$

Nas quais:  $\Delta H$  = entalpia específica (J/mol);  $\Delta S$  = entropia específica (J/mol K);  $\Delta G$  = energia livre de Gibbs (J/ mol);  $k_B$  = constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/ K);  $h_p$  = constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J/s);  $T$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.5 SECAGEM POR LIOFILIZAÇÃO

Para fins comparativos, foi realizada a secagem por liofilização do composto das folhas e do suco dos frutos do Melão de São Caetano, visando analisar os impactos da técnica de secagem em camada de espuma sobre os compostos bioquímicos do material, servindo assim como um parâmetro de validação da técnica.

A secagem por liofilização ocorre pela sublimação da água presente no material. Para isso, o material a ser seco deve ser congelado e submetido à secagem, que acontece sob vácuo e temperaturas mais baixas (Vieira; Nicoleti; Telis, 2012).

Para a secagem, o composto/suco homogêneo do material foi congelado, em refratários de aço inoxidável, e colocado no liofilizador Terroni® LD1500 à  $-40^{\circ}\text{C}$ .

### 3.6 CARACTERÍSTICAS DOS PÓS OBTIDOS

#### 3.6.1 Atividade de água

A atividade de água do material foi determinada através da leitura direta no medidor de atividade de água Novasina LabMaster-aw, no qual 0,3 g da amostra foram pesados em cápsulas plásticas adequadas ao equipamento e em seguida submetido a leitura, na temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.6.2 Teor de água

Para determinar o teor de água dos pós obtidos foi utilizado o método gravimétrico, como descrito no item 3.3.4.

### 3.6.3 Solubilidade em água

A solubilidade do material em água foi determinada seguindo as modificações que Cano-Chauca *et al.* (2005) realizaram do método de Eastman e Moore (1984). O método consiste na diluição do material em água destilada, através de vigorosa agitação, em agitador de soluções (AP 56 da marca Phoenix Luferco), à 3800 rpm, seguida de centrifugação, em centrífuga refrigerada (Novatecnica), à 4500 rpm, por 5 minutos. Depois de centrifugada, uma alíquota do material sobrenadante foi transferida, em recipiente adequado, para a estufa à 105 °C até total evaporação da água. A solubilidade em água foi calculada de acordo com a Equação 13:

$$\% \text{ Solubilidade} = \frac{(m_{\text{residual}} - m_{\text{tara}}) * V_{\text{solução}}}{V_{\text{alíquota}} * m_{\text{amostra}}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Na qual:  $m_{\text{residual}}$  = massa residual obtida após evaporação (g);  $m_{\text{tara}}$  = massa da placa de Petri vazia (g);  $V_{\text{solução}}$  = volume total da solução (mL);  $V_{\text{alíquota}}$  = volume da alíquota submetido à secagem (mL);  $m_{\text{amostra}}$  = massa inicial da amostra (g).

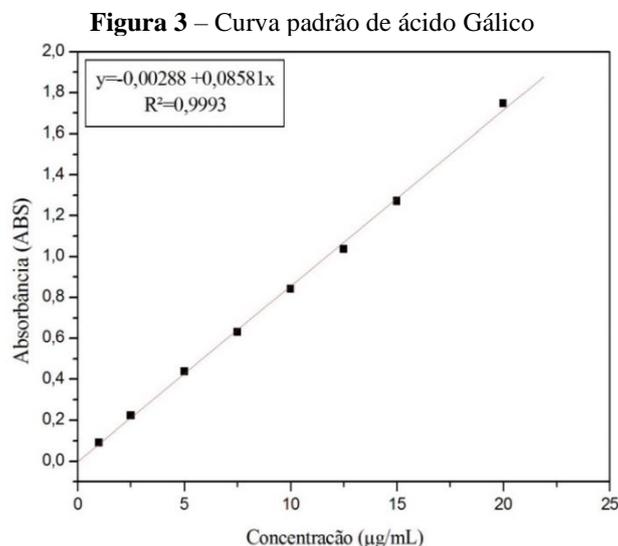
### 3.6.4 Obtenção do extrato

O material foi submetido ao processo de extração para determinação da atividade antioxidante e compostos fenólicos. O extrato foi preparado agitando 2 g da amostra com 80 mL de solução de etanol (50%) por 3 horas. Após o tempo de extração, a mistura foi centrifugada por 10 min a 3500 rpm e o sobrenadante foi coletado como extrato. Em seguida, o extrato coletado foi seco, à 35 °C em estufa com circulação de ar (Solab, modelo SL102). Por fim, o extrato foi preparado na concentração de 5 mg/mL com etanol P.A.

### 3.6.5 Compostos fenólicos

O teor de compostos fenólicos totais das amostras foi determinado de acordo com o método colorimétrico Folin-Ciocalteu. Inicialmente foi preparada uma mistura do reagente de Folin-Ciocalteu com a amostra, seguida de agitação e adição de água destilada e carbonato de sódio a 15%, passando por agitação novamente e mantida no escuro por 2 h e então a absorbância foi medida em espectrofotômetro UV-vis à 760 nm.

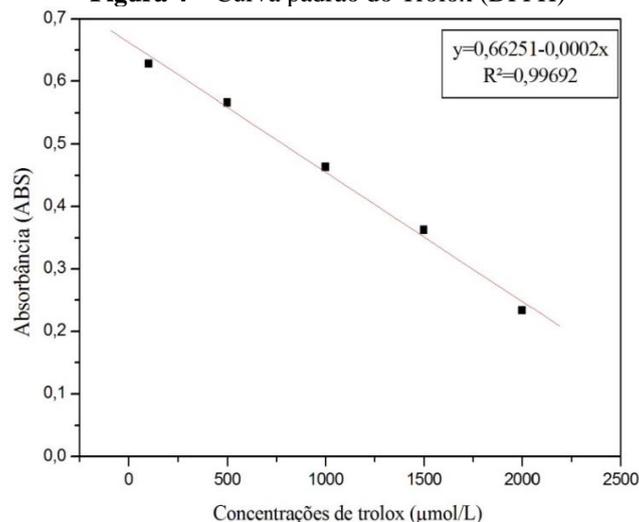
A concentração de compostos fenólicos foi estimada utilizando a curva padrão de ácido Gálico (Figura 3), sendo os resultados expressos em termos de Equivalência ao Ácido Gálico.



Fonte: A autora (2024)

### 3.6.6 Atividade sequestrante do radical DPPH (2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazil)

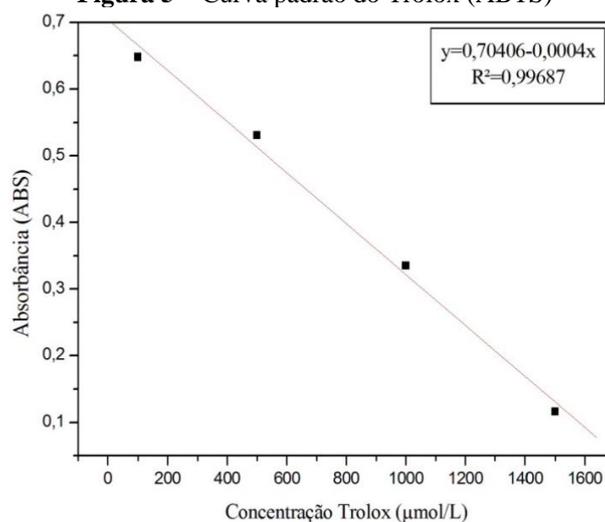
A atividade antioxidante foi determinada através da capacidade dos antioxidantes presentes nas amostras em sequestrar o radical estável DPPH. Alíquotas dos extratos foram misturadas com etanol P.A. e a solução de DPPH, em triplicata. As leituras foram realizadas após 30 min a 517 nm, em espectrofotômetro UV-Vis. Uma curva padrão foi preparada (Figura 4) utilizando Trolox (ácido (±)-6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico) em concentrações determinadas e os resultados da capacidade antioxidante foram expressos em termos de Equivalência ao Trolox.

**Figura 4 – Curva padrão do Trolox (DPPH)**

Fonte: A autora (2024)

### 3.6.7 Atividade sequestrante do radical ABTS (2,2azino bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico))

A capacidade dos antioxidantes presentes nas amostras em sequestrar o radical estável ABTS foi determinada com a mistura de alíquotas dos extratos com o radical ABTS. As leituras de absorbâncias foram realizadas após 6 min a 734 nm, em espectrofotômetro UV-Vis. Uma curva padrão foi preparada (Figura 5) utilizando Trolox em concentrações determinadas e os resultados da capacidade antioxidante foram expressos em termos de Equivalência ao Trolox.

**Figura 5 – Curva padrão do Trolox (ABTS)**

Fonte: A autora (2024)

### 3.6.8 Análises térmicas

A análise termogravimétrica (TG) e a análise térmica diferencial foram realizadas para os pós obtidos nas condições mínimas (3% do agente espumante, 4 minutos de agitação e 50 °C) e máximas (7% do agente espumante, 8 minutos de agitação e 70 °C) do planejamento experimental para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, além dos pós obtidos por liofilização das duas matérias primas, a fim de analisar o comportamento da degradação térmica do material.

Para a análise termogravimétrica e a análise térmica diferencial, foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, variando de 30 °C à 900 °C. Foi utilizada a atmosfera de nitrogênio com um fluxo à 50 mL/min e cadinho de alumina para acondicionar 3 mg das amostras.

### 3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O teste de Tukey foi utilizado para determinar se houve diferença significativa entre os diferentes níveis de um fator.

A análise estatística dos resultados foi realizada pela análise de variância (ANOVA) para uma probabilidade de significância de 0,05 utilizando o Statistica 7.0, onde foram estudados os efeitos principais e as interações das variáveis independentes (concentração do agente espumante, tempo de agitação em batedeira e temperatura de secagem) sobre as características das espumas (densidade, expansão, estabilidade e umidade), sobre o processo de secagem (tempo total de secagem e umidade de equilíbrio) e sobre as características dos pós obtidos (umidade, atividade de água, solubilidade em água, teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidante).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos das análises de caracterização das espumas, das secagens em camada de espuma, assim como os ajustes realizados aos modelos matemáticos. Também serão apresentados os resultados obtidos nas análises de caracterização dos pós obtidos.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA

Nesta seção serão apresentadas as características das espumas obtidas, a partir dos resultados das análises de densidade, expansão, estabilidade e umidade, assim como os efeitos das variáveis do processo sobre essas características.

#### 4.1.1 Densidade aparente da espuma

Os resultados obtidos para a densidade aparente das espumas das folhas e dos frutos do melão de São Caetano podem ser observados na Tabela 6. A análise da densidade foi realizada para as espumas com diferentes concentrações do agente espumante e tempo de agitação, seguindo o planejamento experimental fatorial completo e foram realizadas réplicas para cada experimento, sendo exposto na Tabela 6 o valor da média e seu desvio padrão. De acordo com o teste de Tukey, houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para os diferentes níveis das variáveis independentes.

A densidade da espuma das folhas do melão de São Caetano variou entre  $0,12 \pm 0,00$  g/cm<sup>3</sup> (experimento 4) e  $0,17 \pm 0,00$  g/cm<sup>3</sup> (experimento 1). Enquanto a densidade da espuma dos frutos variou de  $0,08 \pm 0,00$  (experimento 3) a  $0,14 \pm 0,00$  g/cm<sup>3</sup> (experimento 1).

Em todos os experimentos a espuma dos frutos apresentou uma densidade menor do que a espuma das folhas. Baixas densidades da espuma ocasionam sua maior estabilidade, facilitando a remoção de água do material (Kudra; Ratti, 2006), assim, as espumas com menores densidades são as mais indicadas para o processo de secagem.

**Tabela 6** - Resultados obtidos para a densidade aparente da espuma do composto e do suco do melão de São Caetano

Experimento	Cesp (%)	tag (min)	Folhas	Frutos
			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	3 (-1)	4 (-1)	0,17 <sup>a</sup> ± 0,01	0,14 <sup>a</sup> ± 0,00
2	7 (1)	4 (-1)	0,13 <sup>b</sup> ± 0,00	0,09 <sup>cd</sup> ± 0,00
3	3 (-1)	8 (1)	0,15 <sup>ac</sup> ± 0,02	0,08 <sup>e</sup> ± 0,00
4	7 (1)	8 (1)	0,12 <sup>b</sup> ± 0,00	0,08 <sup>e</sup> ± 0,00
5	5 (0)	6 (0)	0,13 <sup>b</sup> ± 0,00	0,10 <sup>b</sup> ± 0,00
6	5 (0)	6 (0)	0,13 <sup>bc</sup> ± 0,01	0,10 <sup>bc</sup> ± 0,01
7	5 (0)	6 (0)	0,12 <sup>bc</sup> ± 0,01	0,09 <sup>de</sup> ± 0,00

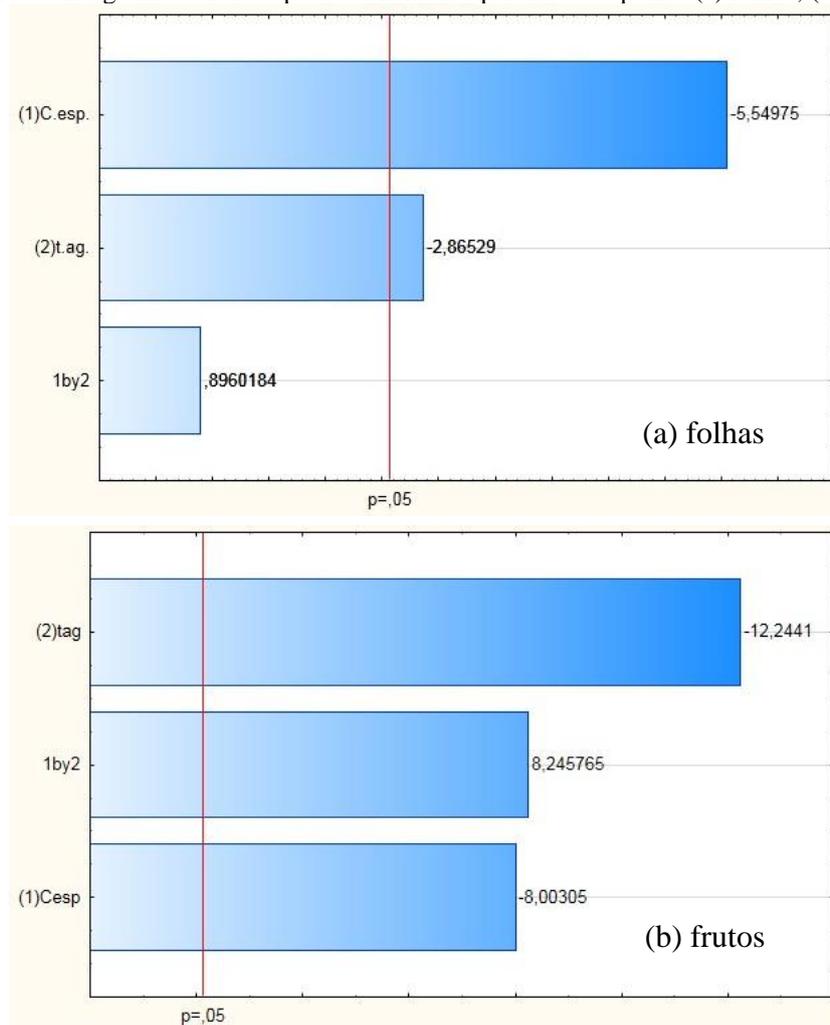
Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si (p<0,05) pelo teste de Tukey.

Fonte: A autora (2024)

O Diagrama de Pareto para a densidade aparente da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observado na Figura 6, onde é possível identificar os efeitos das variáveis independentes sobre a densidade da espuma.

A concentração do agente espumante (Cesp) foi a variável que mais afetou, estatisticamente (p<0,05), a densidade da espuma das folhas do Melão de São Caetano, sendo seu efeito de sinal negativo. A densidade da espuma dos frutos também é afetada estatisticamente (p<0,05), com efeito de sinal negativo pela concentração do agente espumante. Assim, a densidade da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano diminui com o aumento da concentração do agente espumante, dentro da faixa estudada, como esperado.

**Figura 6** - Diagrama de Pareto para a densidade aparente da espuma: (a) folhas; (b) frutos

Fonte: A autora (2024)

O aumento da concentração do agente espumante também ocasionou uma diminuição na densidade da espuma das folhas da gravioleira (*Annona muricata* Linn), onde houve uma redução de  $0,0941 \text{ g/cm}^3$  para  $0,0781 \text{ g/cm}^3$  da densidade ao aumentar a concentração do Portogel® de 3% para 5% (Oliveira *et al.*, 2020). Esse comportamento também foi observado na secagem em camada de espuma do cacau enriquecido com extrato de hortelã-pimenta, onde houve a redução da densidade da espuma de  $944 \text{ g/L}$  para  $551 \text{ g/L}$  ao aumentar a concentração da clara de ovo de 40 g para 80 g (Benkovic *et al.* 2019) e na densidade da espuma do *Hibiscus sabdariffa* L., com a redução da densidade de  $0,34 \text{ g/cm}^3$  para  $0,20 \text{ g/cm}^3$  com o aumento da concentração da albumina de 5% para 20% (Tan; Sulaiman, 2019).

O tempo de agitação (tag) foi a variável que apresentou maior influência, estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ), sobre a densidade da espuma dos frutos, sendo

essa influência inversamente proporcional. A densidade da espuma das folhas também sofreu influência, estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) e com efeito negativo do tempo de agitação. Portanto, o aumento do tempo de agitação reduziu a densidade da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.

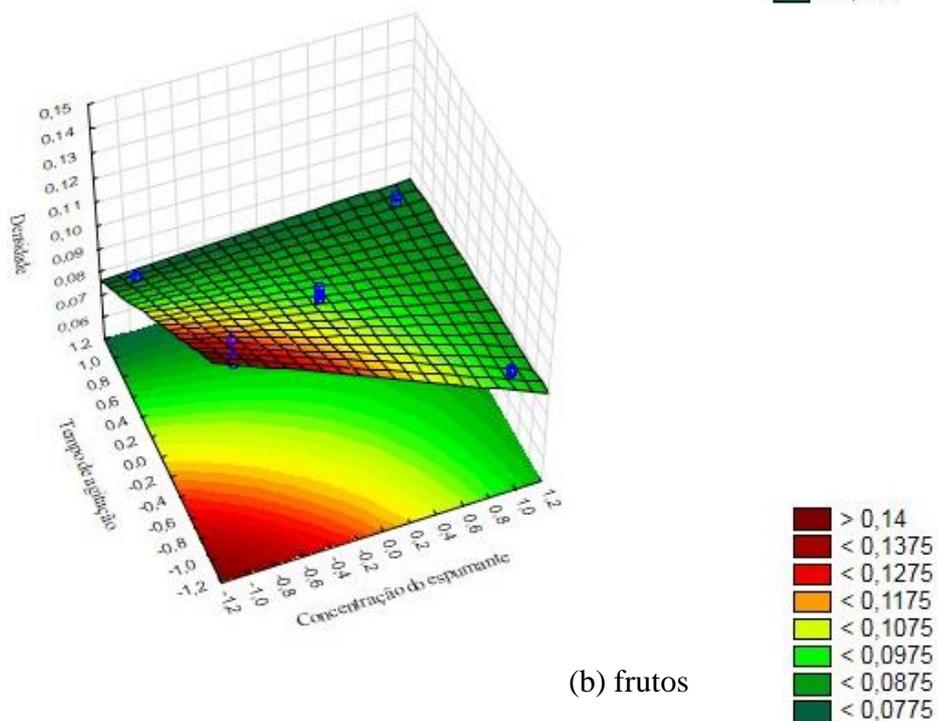
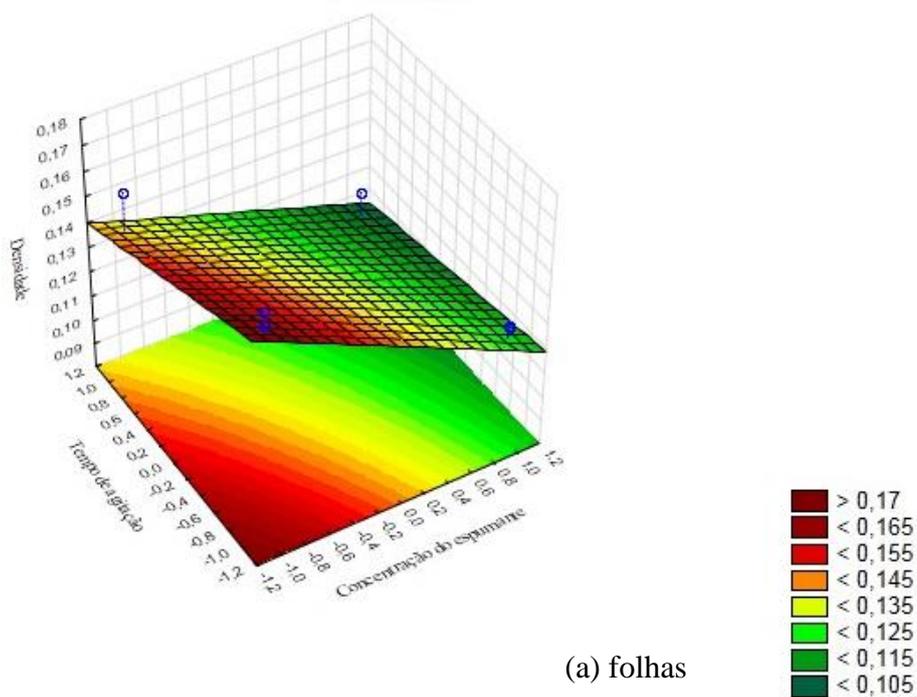
O efeito do tempo de agitação sobre a densidade também foi observado no estudo da secagem em camada de espuma das folhas da gravioleira (*Annona muricata* Linn), onde a densidade foi de 0,0941 g/cm<sup>3</sup> com o tempo de 3 min e de 0,0702 g/cm<sup>3</sup> com o tempo de 5 min (Oliveira *et al.*, 2020).

A diminuição da densidade foi reportada por Azizpour *et al.* (2013) como um indicativo de maior volume de ar retido na espuma durante a sua formação. Tanto o agente espumante quanto o tempo de agitação proporcionam uma maior incorporação de ar na espuma e isso justifica a diminuição da densidade com o aumento dessas variáveis.

O efeito da concentração do agente espumante e do tempo de agitação sobre a densidade da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observado na Figura 7.

Através da Figura 7 pode ser observado o efeito negativo da concentração do agente espumante e do tempo de agitação, causando a diminuição da densidade com o acréscimo dessas variáveis, tanto para o fruto quanto para as folhas.

**Figura 7** - Superfície de resposta para a densidade da espuma em função da concentração do agente espumante e do tempo de agitação: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

#### 4.1.2 Expansão da espuma

A expansão da espuma, das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, foi determinada para os diferentes níveis de concentração do agente espumante e do tempo

de agitação, de acordo com o planejamento experimental. Cada experimento foi realizado em triplicata e o resultado exposto na Tabela 7 é a média obtida e seu desvio padrão. Foi observado que houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) da expansão da espuma, de acordo com o teste de Tukey, para os diferentes níveis de concentração do agente espumante e do tempo de agitação.

Os menores valores de expansão da espuma das folhas do Melão de São Caetano foram de  $437 \pm 34$  e  $444 \pm 22\%$ , nos experimentos 3 e 1 respectivamente, em que ambos foram realizados com 3% do agente espumante. Já as maiores expansão foram obtidas nos experimentos com 5% e 7% de agente espumante (experimento 5 e 4, respectivamente), onde a espuma expandiu  $773 \pm 40\%$  e  $753 \pm 53\%$ , respectivamente.

**Tabela 7** - Resultados obtidos para a análise de expansão da espuma das folhas e dos frutos do melão de São Caetano

Experimento	Cesp (%)	tag (min)	Folhas	Frutos
			Expansão da espuma (%)	Expansão da espuma (%)
1	3 (-1)	4 (-1)	$444^{ac} \pm 22$	$667^{cd} \pm 83$
2	7 (1)	4 (-1)	$541^{abde} \pm 8$	$605^d \pm 83$
3	3 (-1)	8 (1)	$437^{ae} \pm 34$	$754^{bcd} \pm 56$
4	7 (1)	8 (1)	$753^{bcde} \pm 53$	$991^a \pm 27$
5	5 (0)	6 (0)	$773^{cde} \pm 40$	$851^{abc} \pm 8$
6	5 (0)	6 (0)	$750^{de} \pm 69$	$896^{ab} \pm 8$
7	5 (0)	6 (0)	$645^e \pm 68$	$850^{abc} \pm 43$

Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

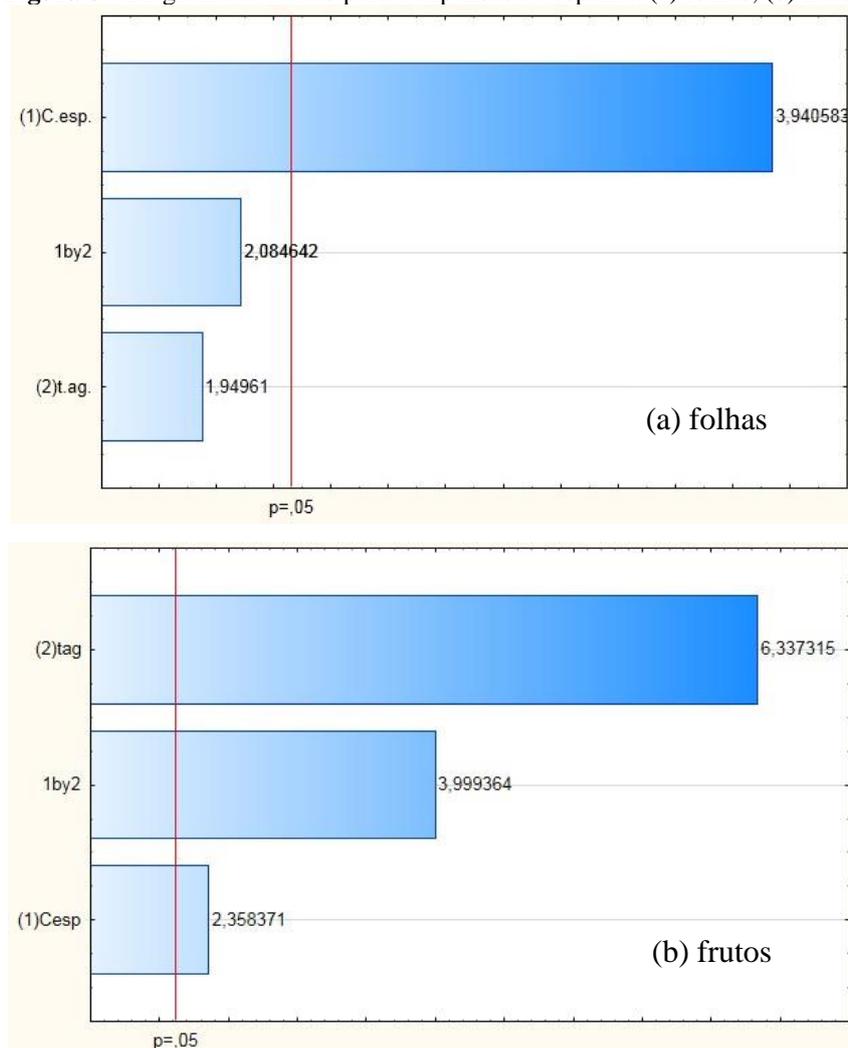
A menor expansão da espuma dos frutos do Melão de São Caetano foi de  $605 \pm 83\%$ , no experimento 2, com o menor tempo de agitação. E a maior expansão foi de  $991 \pm 27\%$ , no experimento 4, com o maior tempo de agitação. Em todas as condições do planejamento, a espuma do fruto do Melão de São Caetano obteve uma expansão maior do que a espuma das folhas.

A análise estatística evidenciando os efeitos da concentração do agente espumante e do tempo de agitação sobre a expansão da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observada na Figura 8.

A concentração do agente espumante (Cesp) foi a única variável que afetou, estatisticamente ( $p < 0,05$ ), a expansão da espuma das folhas do Melão de São Caetano. A concentração do agente espumante teve influência de sinal positivo sobre a expansão da espuma dos frutos, o que indica que o aumento na concentração do agente espumante ocasionou um aumento na expansão da espuma das folhas e dos frutos.

Resultados similares foram encontrados em outros trabalhos, como no estudo da secagem em camada de espuma da polpa de maçã, onde os autores relataram que a expansão no ponto máximo da concentração do agente espumante foi 4,22 vezes maior do que a expansão no ponto mínimo de agente espumante (Khodifad; Kumar, 2020). Em outro estudo, a espuma da polpa de acerola também apresentou um aumento na sua expansão ao aumentar a concentração do Emustab® e Liga Neutra (agente espumante e estabilizante) (Coelho *et al.*, 2019).

**Figura 8** - Diagrama de Pareto para a expansão da espuma: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

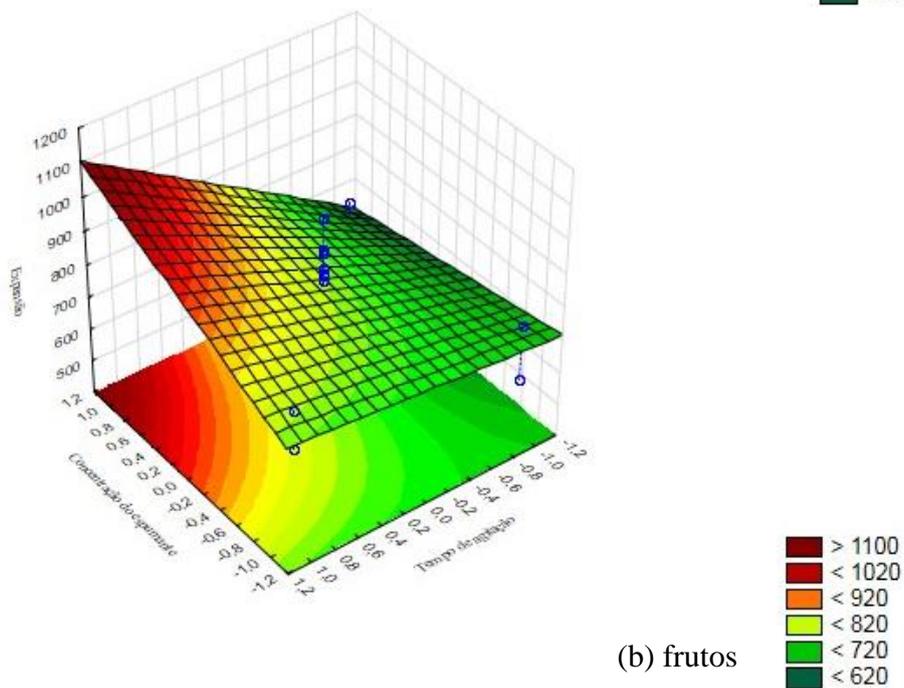
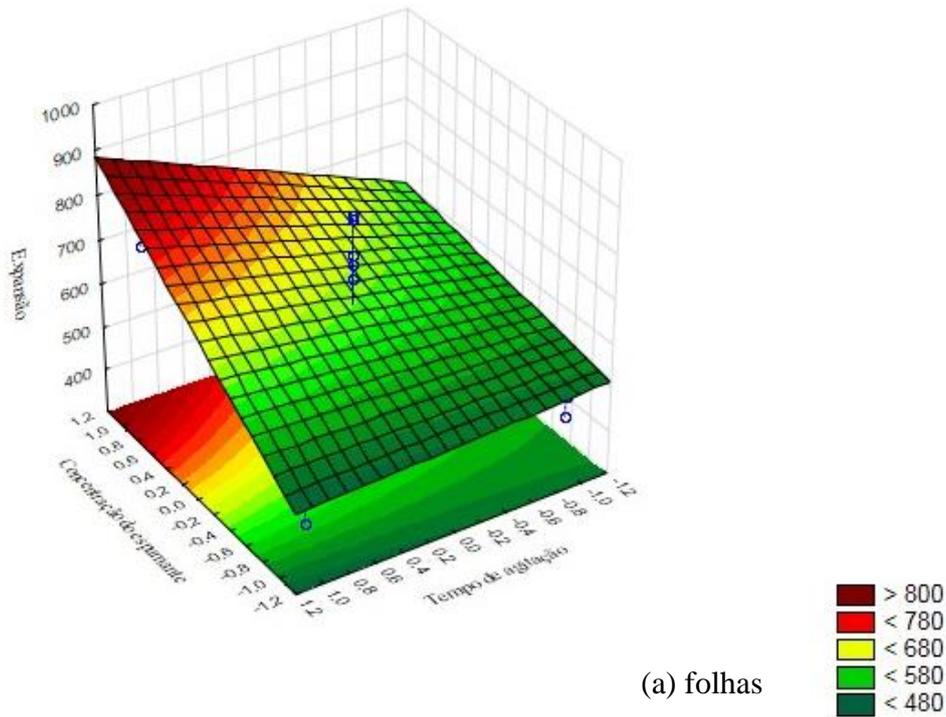
O tempo de agitação foi a variável que mais influenciou, de forma significativa ( $p < 0,05$ ), a expansão da espuma dos frutos do Melão de São Caetano e o efeito dessa influência é positiva, indicando que o aumento do tempo de agitação acarreta o aumento da expansão da espuma. Para a espuma das folhas, o tempo de agitação não apresentou uma influência significativa ( $p < 0,05$ ) sobre a expansão, porém, apresentou um efeito positivo, indicando que o aumento nessa variável tem uma tendência a aumentar a expansão da espuma das folhas. Comportamento similar foi encontrado no estudo da secagem em camada de espuma do suco de louro cereja, onde os autores também relataram efeito positivo do tempo de agitação sobre a expansão da espuma (Guldane; Bazkir, 2024).

O efeito da concentração do agente espumante e do tempo de agitação sobre a expansão da espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano pode ser observado na Figura 9.

Foi observado que as maiores expansões da espuma, tanto para as folhas, quanto para os frutos, estão concentradas na região com os maiores tempos de agitação. Mesmo essa variável não apresentando influência dentro do intervalo de significância analisado ( $p < 0,05$ ) para a espuma das folhas, ela interferiu de forma proporcional a expansão da espuma, indicando que quanto maior o tempo de agitação maior será a expansão da espuma, sendo esse efeito causado pela maior incorporação de ar à solução durante a agitação.

Também foi evidenciado o efeito de sinal positivo da concentração do agente espumante sobre a expansão da espuma das folhas e frutos. A expansão da espuma está ligada ao volume de ar incorporado à solução durante a sua formação. O aumento na quantidade do agente espumante acarreta o aumento da capacidade formadora de espuma da solução, proporcionando uma maior inserção de ar e, conseqüentemente, resulta em uma maior expansão da espuma.

**Figura 9** - Superfície de resposta para a expansão da espuma em função da concentração do agente espumante e do tempo de agitação: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

### 4.1.3 Estabilidade da espuma

A estabilidade é uma importante característica da espuma que interfere no processo de secagem, isso porque a espuma deve se manter mecânica e

termodinamicamente estável, pois o seu colapso acarreta a desestruturação celular tornando ineficiente a remoção da água da superfície e reduz a qualidade do produto final obtido (Bag; Srivastav; Mishra, 2011).

A estabilidade da espuma foi avaliada nas diferentes condições de secagem, seguindo o planejamento experimental. Os experimentos foram realizados em triplicata, sendo exposto na Tabela 8 a média e o desvio padrão dos índices de estabilidade calculados. Foi realizado o teste de Tukey para avaliar a diferença entre os resultados e foi observado que houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os índices de estabilidade obtidos.

**Tabela 8** - Índices de estabilidade da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano obtidos nas diferentes condições do planejamento experimental

Experimento	Cesp (%)	tag (min)	T (°C)	Folhas	Frutos
				Índice de estabilidade	Índice de estabilidade
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	0,97 <sup>ac</sup> ± 0,00	0,99 <sup>acd</sup> ± 0,01
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	0,98 <sup>a</sup> ± 0,00	1,00 <sup>a</sup> ± 0,00
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	0,96 <sup>b</sup> ± 0,00	1,00 <sup>ab</sup> ± 0,00
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	0,98 <sup>a</sup> ± 0,00	1,00 <sup>ab</sup> ± 0,00
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	0,96 <sup>c</sup> ± 0,00	0,97 <sup>e</sup> ± 0,00
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	0,97 <sup>c</sup> ± 0,00	0,99 <sup>cd</sup> ± 0,00
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	0,96 <sup>d</sup> ± 0,00	0,98 <sup>de</sup> ± 0,00
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	0,98 <sup>a</sup> ± 0,00	1,00 <sup>ab</sup> ± 0,00
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	0,97 <sup>acde</sup> ± 0,00	0,99 <sup>abc</sup> ± 0,00
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	0,97 <sup>acde</sup> ± 0,00	0,99 <sup>abc</sup> ± 0,00
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	0,96 <sup>bcd</sup> ± 0,00	0,99 <sup>abc</sup> ± 0,00

Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T - temperatura

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

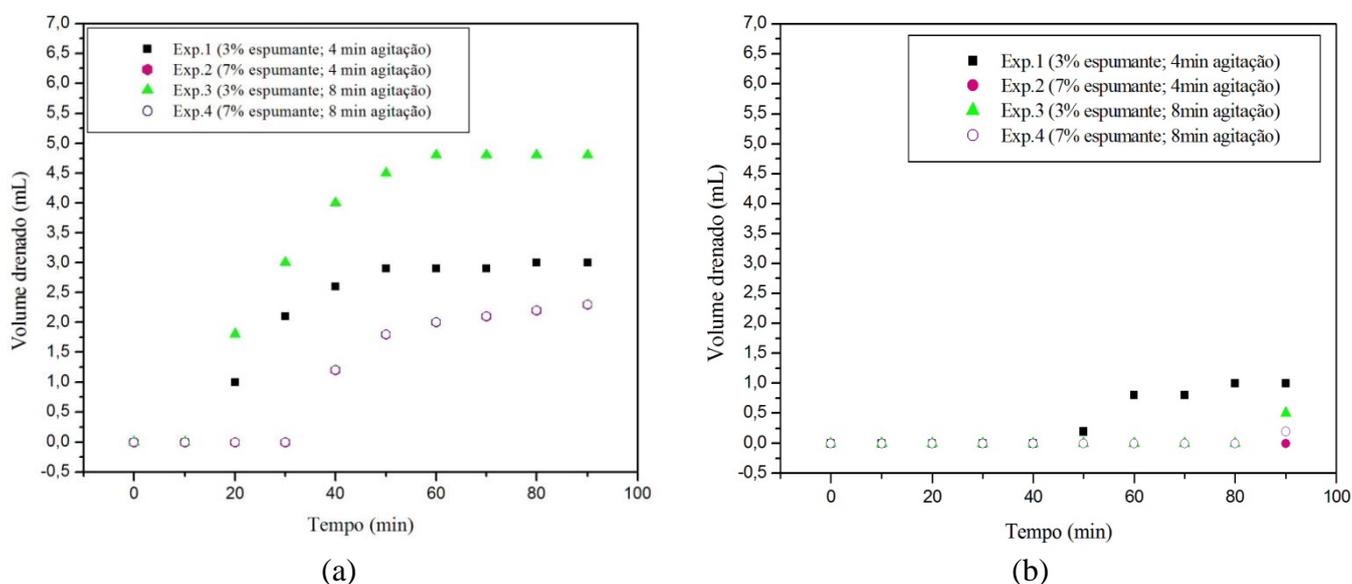
Fonte: A autora (2024)

O índice de estabilidade varia entre 0 e 1, sendo 1 a condição de espuma mais estável, ou seja, aquela que não apresenta desprendimento de líquido. O índice de estabilidade das espumas das folhas do Melão de São Caetano variou de  $0,96 \pm 0,00$  (experimento 3) à  $0,98 \pm 0,00$  (experimento 8), enquanto dos frutos variou de  $0,97 \pm 0,00$  (experimento 5) à  $1,00 \pm 0,00$  (experimentos 2, 3, 4 e 8). Em todas as condições do

planejamento experimental o índice de estabilidade dos frutos foi superior ao da folha, indicando que, nas mesmas condições, a espuma dos frutos é mais estável do que a espuma das folhas.

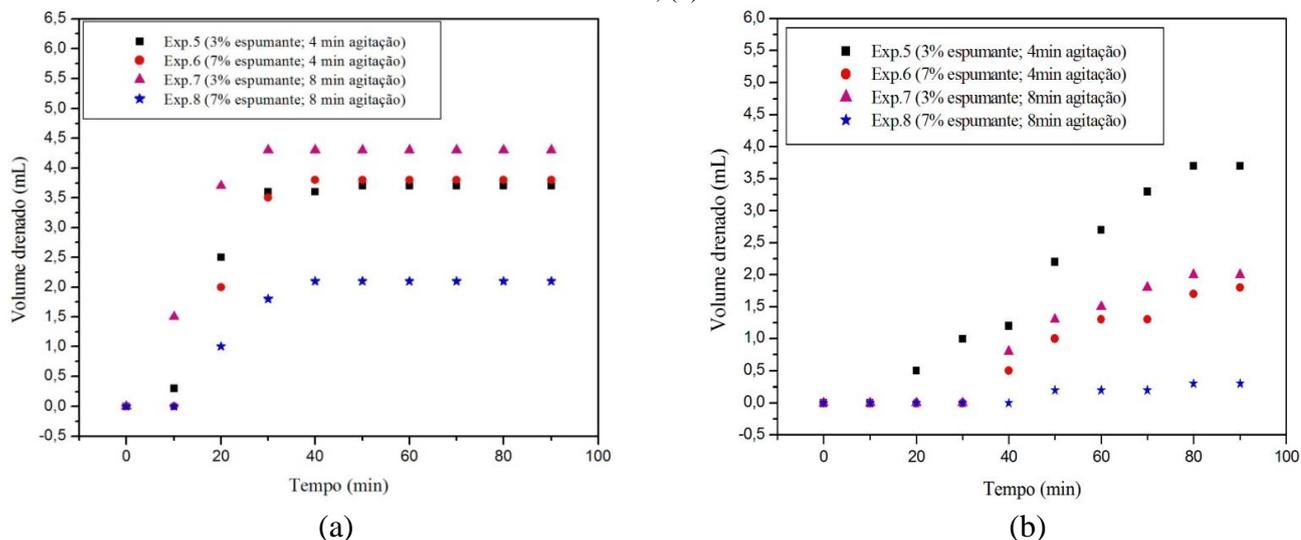
A maior estabilidade da espuma dos frutos é perceptível nas Figuras 10 e 11, nas quais se observa que os volumes drenados nas espumas do fruto são inferiores aos volumes drenados nas espumas das folhas, nas diferentes temperaturas de secagem (50 °C e 70 °C).

**Figura 10** - Drenagem do líquido da espuma, ao decorrer do tempo, na temperatura de 50 °C para: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 11** - Drenagem do líquido da espuma, ao decorrer do tempo, na temperatura de 70 °C para: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

Com os resultados obtidos foi observado que, tanto para as folhas quanto para os frutos, a estabilidade da espuma é maior nos experimentos com maiores concentrações do agente espumante, onde é possível notar uma menor drenagem de líquido das espumas com maiores concentração do agente espumante.

Para a espuma das folhas, na temperatura de 50 °C, houve uma redução de 52% do volume drenado ao aumentar a concentração do agente espumante de 3% (experimento 3) para 7% (experimento 4). Na temperatura de 70 °C, o volume drenado da espuma do experimento 8 (7% do agente espumante) foi 51% menor do que o volume drenado da espuma do experimento 7 (3% do agente espumante).

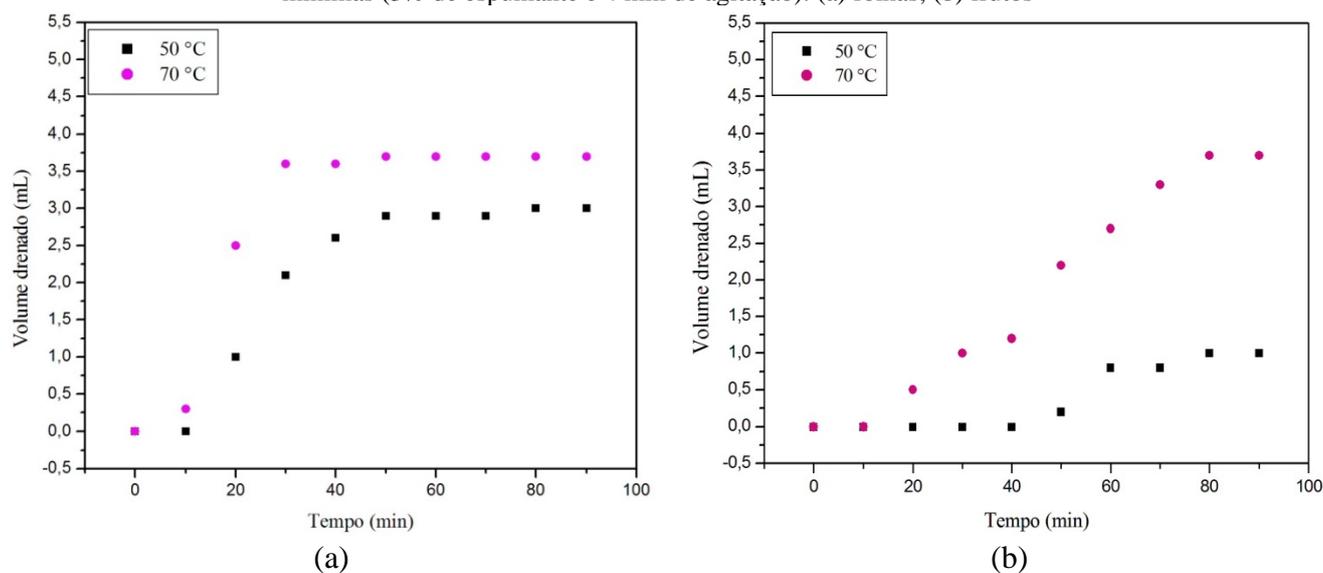
Para a espuma dos frutos o impacto do aumento da concentração do agente espumante sobre a estabilidade da espuma foi mais evidente na temperatura de 50 °C, onde não houve nenhum desprendimento de líquido na espuma com 7% do agente espumante (experimento 2), enquanto na espuma com 3% do agente espumante houve 1,0 mL de líquido drenado. Na temperatura de 70 °C a espuma com 7% do agente espumante (experimento 8) desprendeu 85% menos líquido do que a espuma com 3% do agente espumante (experimento 7).

Com a análise das curvas também foi observado que com tempo há uma redução na velocidade de desprendimento do líquido até atingir o momento que essa drenagem cessa. À medida que a umidade da espuma vai sendo removida, devido ao processo de secagem, ocorre uma diminuição do volume drenado até não possuir mais líquido presente para ser desprendido. Esse comportamento é mais perceptível nas espumas das folhas.

Nas Figuras 12 e 13 são mostradas as curvas de drenagem de líquido, ao decorrer do tempo, das espumas nas mesmas condições de concentração do agente espumante e tempo de agitação e em diferentes temperaturas e foi observado como a temperatura interfere no desprendimento de líquido da espuma.

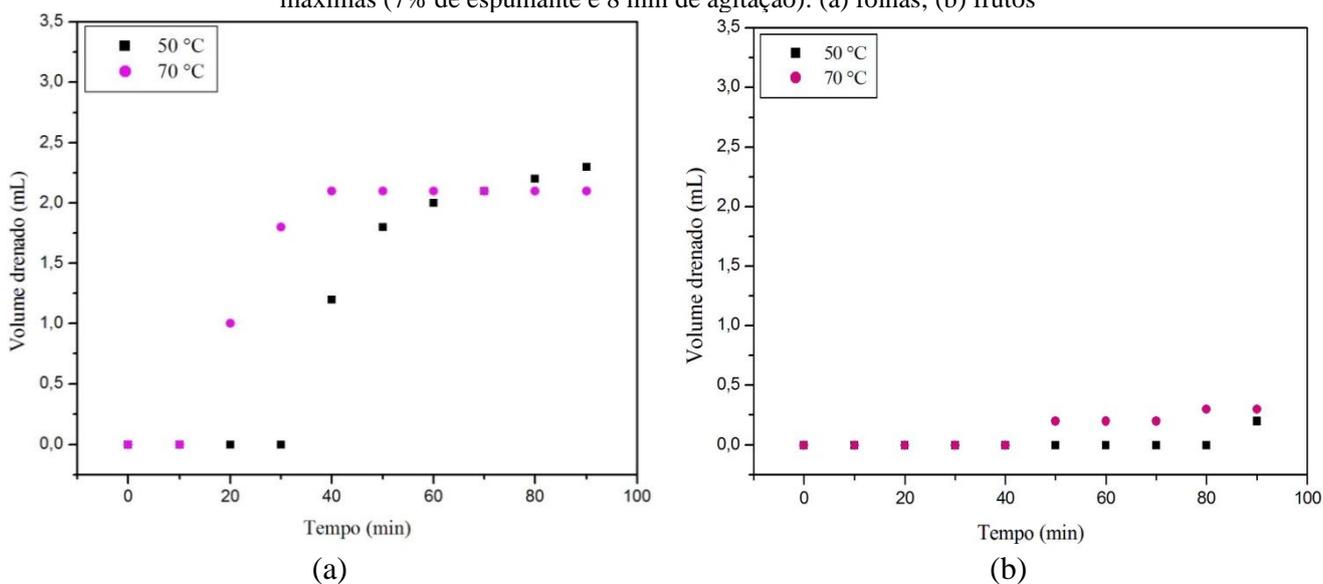
Tanto nas condições mínimas da formação da espuma, quanto nas máximas, para as folhas e para os frutos, percebeu-se que a temperatura afeta a drenagem de líquido da espuma, sendo o desprendimento maior na temperatura mais elevada.

**Figura 12** - Desprendimento de líquido da espuma, nas diferentes temperaturas, para as condições mínimas (3% de espumante e 4 min de agitação): (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 13** - Desprendimento de líquido da espuma, nas diferentes temperaturas, para as condições máximas (7% de espumante e 8 min de agitação): (a) folhas; (b) frutos

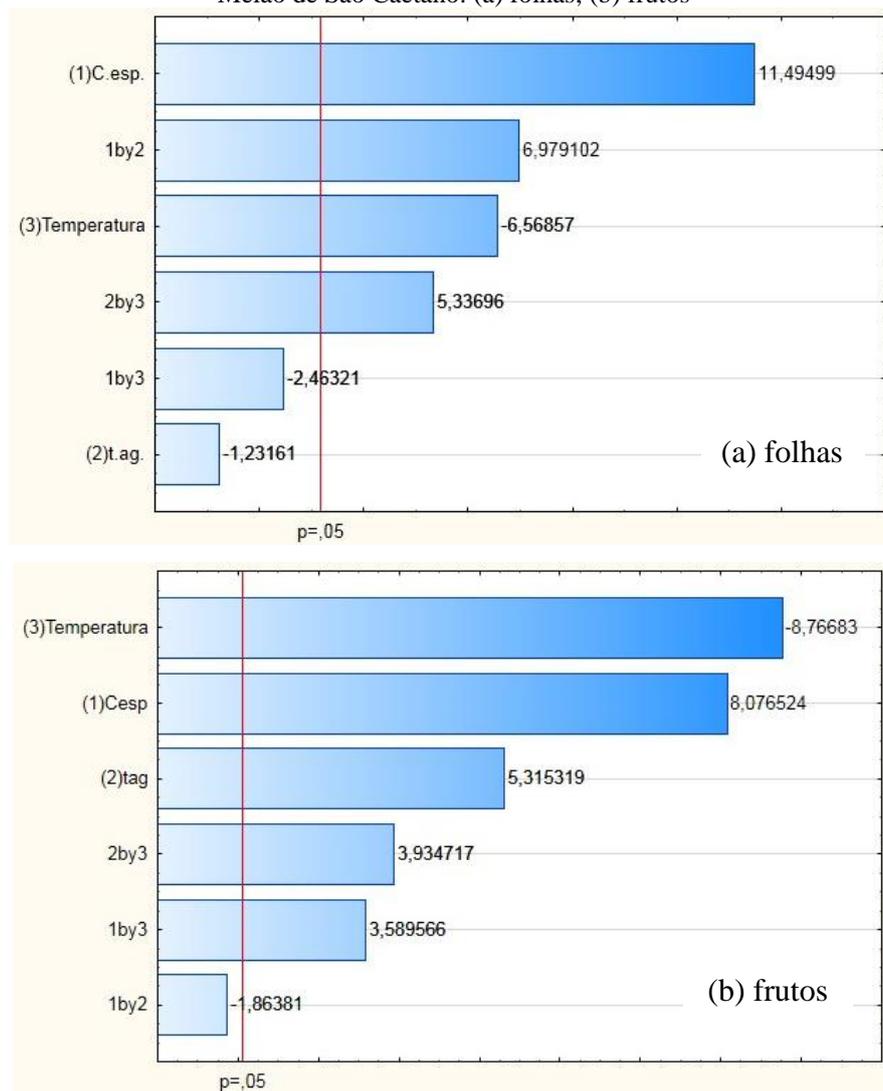


Fonte: A autora (2024)

De acordo com a análise estatística, que pode ser observada nas Figuras 14 e 15, tanto para a espuma das folhas, quanto para a espuma dos frutos, a temperatura de secagem (T) apresentou uma influência significativa ( $p < 0,05$ ) inversamente proporcional sobre a estabilidade da espuma, ou seja, quanto maior o seu valor menos estável a espuma se manterá. Essa variável é a de maior influência na estabilidade da espuma dos frutos.

Comportamento similar foi observado por Oliveira *et al.* (2020) ao avaliar a estabilidade da espuma das folhas da gravioleira (*Annona muricata* Linn), observando um acréscimo no volume de líquido drenado da espuma com o aumento da temperatura, sendo drenado 4,4 mL de líquido na temperatura de 70 °C e 2,5 mL na temperatura de 50 °C, para as mesmas condições de produção da espuma.

**Figura 14** - Diagrama de Pareto para os índices de estabilidade das espumas das diferentes partes do Melão de São Caetano: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

Para a espuma das folhas do Melão de São Caetano a concentração do agente espumante (Cesp) foi a variável que mais afetou, significativamente ( $p<0,05$ ), a estabilidade da espuma, sendo essa influência diretamente proporcional. Mesmo não sendo a variável de maior influência, a concentração do agente espumante também afetou

significativamente ( $p < 0,05$ ), de forma positiva, a estabilidade da espuma dos frutos, indicando que, tanto para as folhas, quanto para os frutos, o aumento na concentração do agente espumante acarreta o aumento na estabilidade da espuma.

A adição de agentes espumantes ou estabilizantes pode ajudar a evitar colapso da espuma durante a desidratação (Ratti; Kudra, 2006), o que justifica o efeito positivo da concentração do agente espumante na estabilidade da espuma.

A influência da concentração do agente espumante também foi observada por Guldane e Bozkir (2024) ao analisarem as características das espumas do louro cereja (*Laurocerasus officinalis* L.), onde relataram um aumento da estabilidade da espuma de  $52,00 \pm 1,63\%$  para  $67,00 \pm 1,41\%$  ao aumentarem a concentração da clara de ovo (agente espumante) de 5% para 10%. Comportamento similar ocorreu com a espuma do sorgo (*Sorghum bicolor* L.), onde a adição de 10% e 4,5% da maltodextrina aumentou significativamente a estabilidade da espuma (Romulo; Aurellia, 2024).

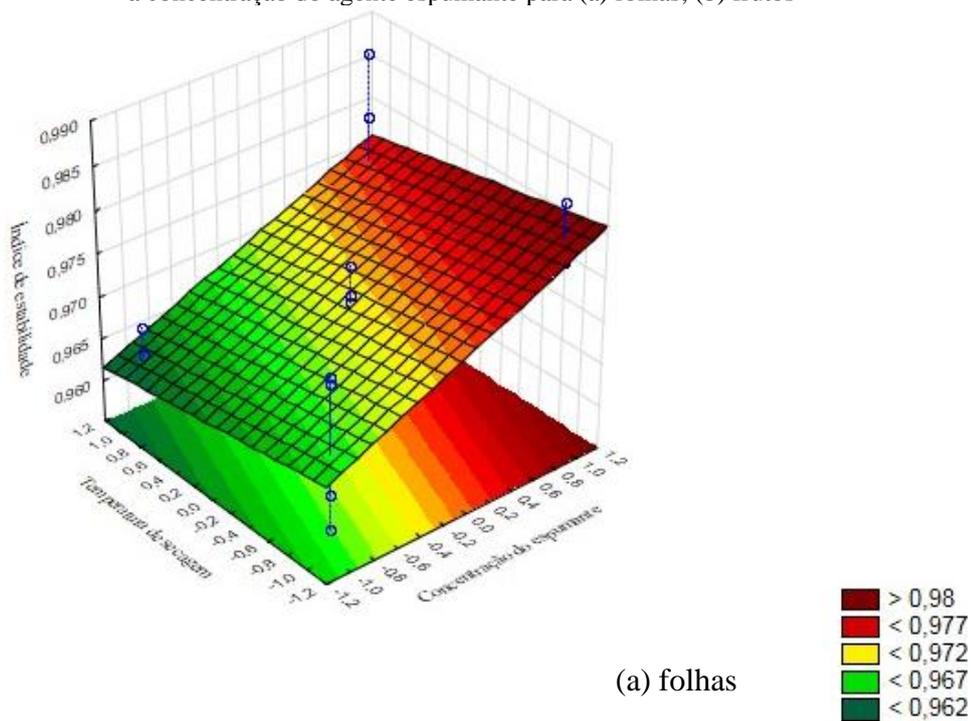
O tempo de agitação (tag) não afetou, de forma significativa ( $p < 0,05$ ), a estabilidade da espuma das folhas, mas influenciou significativamente ( $p < 0,05$ ) a estabilidade da espuma dos frutos, sendo essa influência diretamente proporcional, indicando que o aumento no tempo de agitação ocasiona um aumento na estabilidade da espuma dos frutos.

O tempo de agitação também teve uma influência positiva na estabilidade da espuma do louro cereja (*Laurocerasus officinalis* L.), como relatado por Guldane e Bozkir (2024).

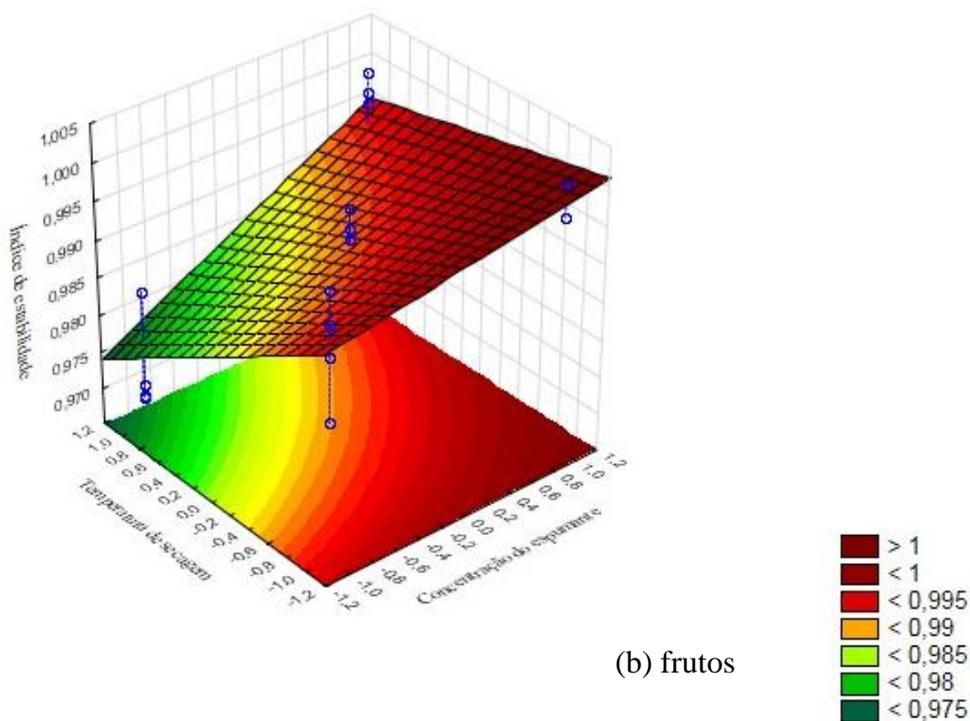
O efeito da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante sobre a estabilidade da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observado na Figura 15.

A partir da Figura 15 foi observado, tanto para as folhas, quanto para os frutos, o aumento da estabilidade da espuma com o aumento da concentração do agente espumante e com a diminuição da temperatura, corroborando com o comportamento observado na Figura 14. Além disso, ficou mais perceptível a maior influência da concentração do agente espumante sobre a estabilidade das folhas, além de que a temperatura afeta mais a estabilidade dos frutos.

**Figura 15** - Superfície de resposta para a estabilidade da espuma em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante para (a) folhas; (b) frutos



(a) folhas



(b) frutos

Fonte: A autora (2024)

#### 4.1.4 Teor de água

As análises do teor de água da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano foram realizadas nas condições propostas no planejamento experimental fatorial

completo, sendo cada experimento realizado em triplicata. Na Tabela 9 são mostradas a médias obtidas para cada experimento assim como seu o desvio padrão.

**Tabela 9-** Resultados obtidos para a análise de teor de água da espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano

Experimento	Cesp (%)	tag (min)	Folhas	Frutos
			Teor de água (%)	Teor de água (%)
1	3 (-1)	4 (-1)	90,4828 <sup>a</sup> ± 0,0962	95,9118 <sup>a</sup> ± 0,0092
2	7 (1)	4 (-1)	89,6802 <sup>b</sup> ± 0,0829	95,3690 <sup>bc</sup> ± 0,0543
3	3 (-1)	8 (1)	89,6119 <sup>b</sup> ± 0,0905	95,5580 <sup>b</sup> ± 0,0660
4	7 (1)	8 (1)	89,4372 <sup>bd</sup> ± 0,0699	94,7872 <sup>e</sup> ± 0,0561
5	5 (0)	6 (0)	90,1190 <sup>c</sup> ± 0,1048	95,1700 <sup>d</sup> ± 0,0954
6	5 (0)	6 (0)	89,5493 <sup>b</sup> ± 0,0485	95,2397 <sup>cd</sup> ± 0,0548
7	5 (0)	6 (0)	89,1861 <sup>d</sup> ± 0,1175	95,1897 <sup>cd</sup> ± 0,0263

Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação

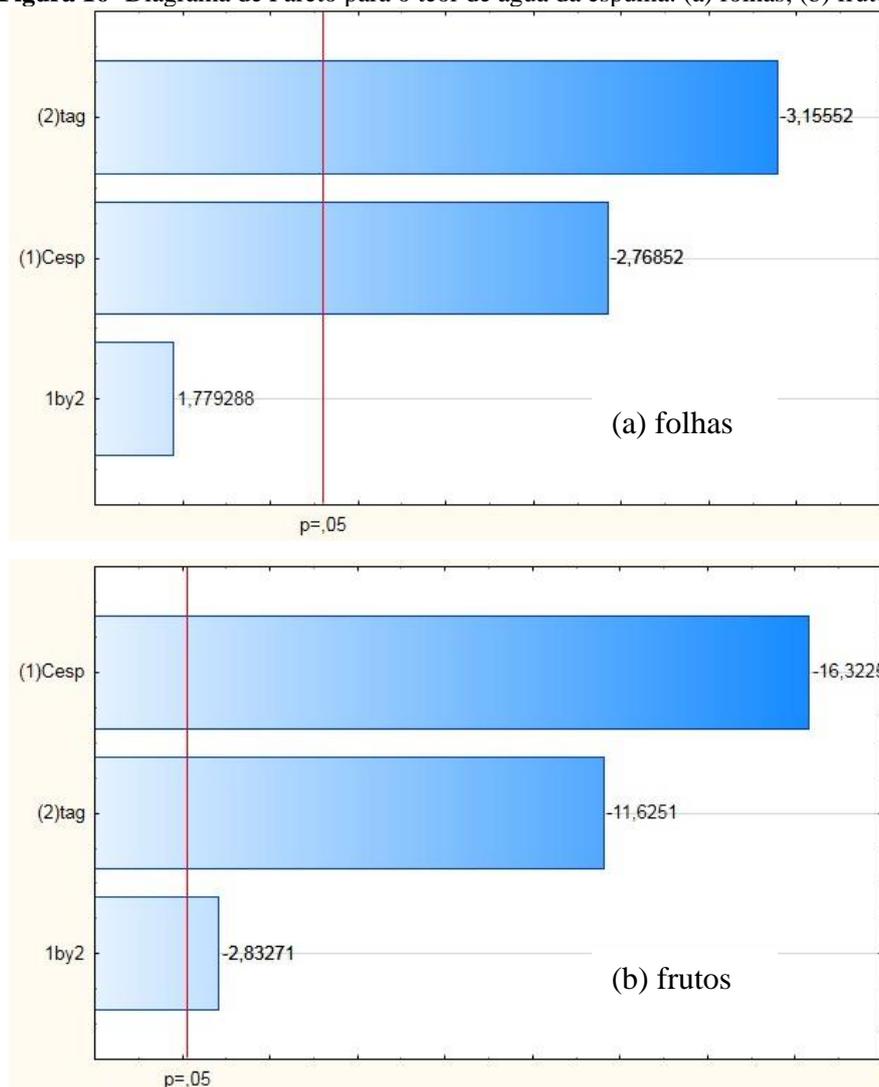
Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

De acordo com os resultados, observou-se que houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o teor de água da espuma em diferentes níveis de concentração do espumante e tempo de agitação, de acordo com o teste de Tukey.

O teor de água da espuma das folhas variou de 89,1861 ± 0,1175% até 90,4828 ± 0,0962%, para os experimentos 7 e 1, respectivamente. Para a espuma dos frutos o teor de água variou de 94,7872 ± 0,0561% (experimento 4) à 95,9118 ± 0,0092% (experimento 1). Em todos os experimentos o teor de água dos frutos foi maior do que o teor de água das folhas.

Os efeitos das variáveis independentes sobre o teor de água da espuma das folhas e dos frutos podem ser observados na Figura 16.

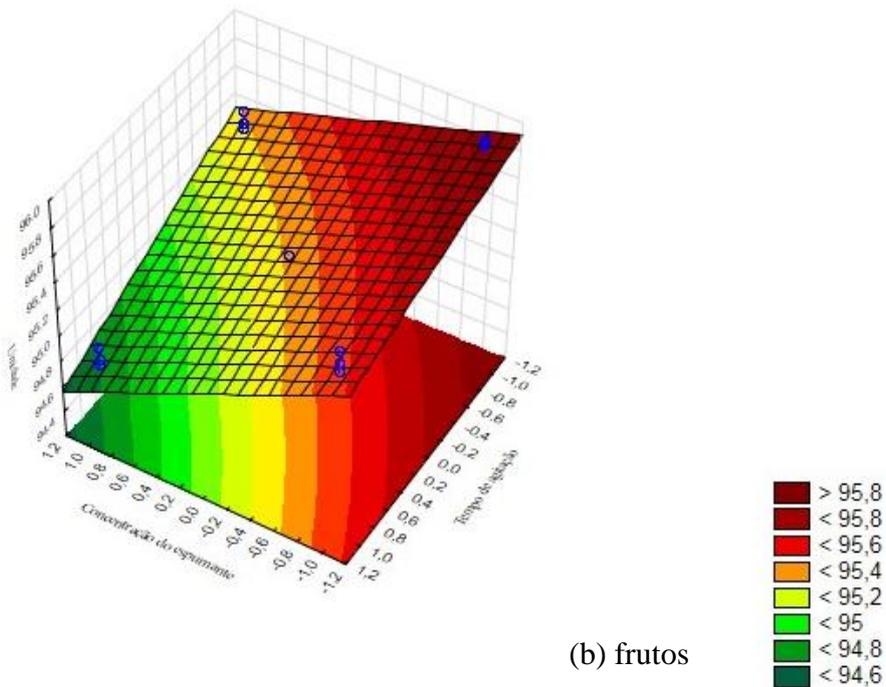
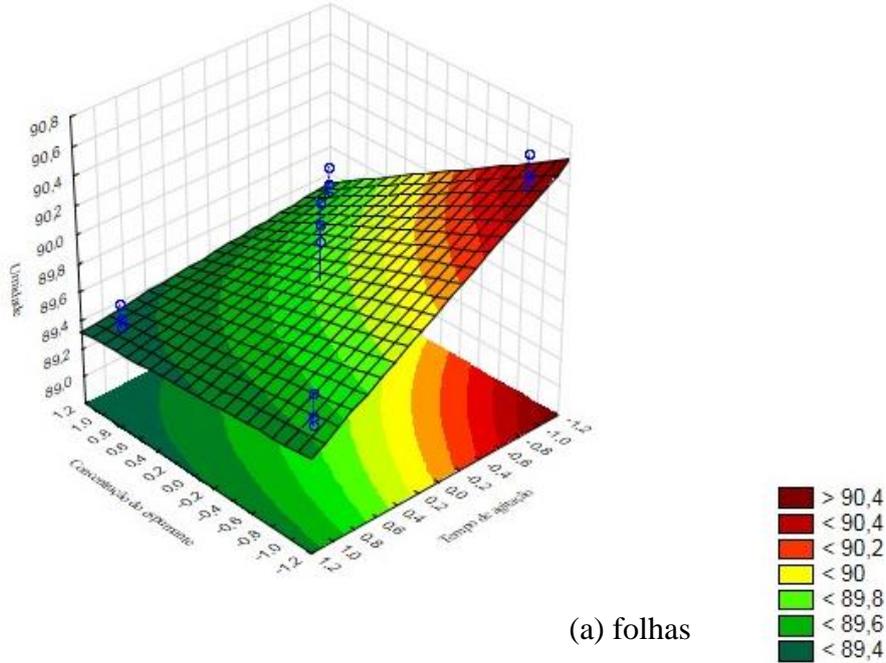
**Figura 16-** Diagrama de Pareto para o teor de água da espuma: (a) folhas; (b) frutos

Fonte: A autora (2024)

Tanto a concentração do agente espumante (Cesp) quanto o tempo de agitação (tag) apresentaram efeitos estatisticamente significativos ( $p < 0,05$ ) sobre o teor de água da espuma das folhas e dos frutos. Ambas as variáveis tiveram efeito de sinal negativo sobre o teor de água da espuma, indicando que o aumento na concentração do agente espumante e no tempo de agitação ocasiona uma diminuição do teor de água da espuma. Para a espuma das folhas, o tempo de agitação (tag) foi a variável que mais afetou o teor de água, enquanto para a espuma dos frutos a variável de maior influência foi a concentração do agente espumante.

Nas superfícies de resposta da Figura 17 é possível perceber o efeito da concentração do agente espumante e do tempo de agitação no teor de água das folhas e dos frutos.

**Figura 17** - Superfície de resposta para o teor de água da espuma em função da concentração do agente espumante e do tempo de agitação



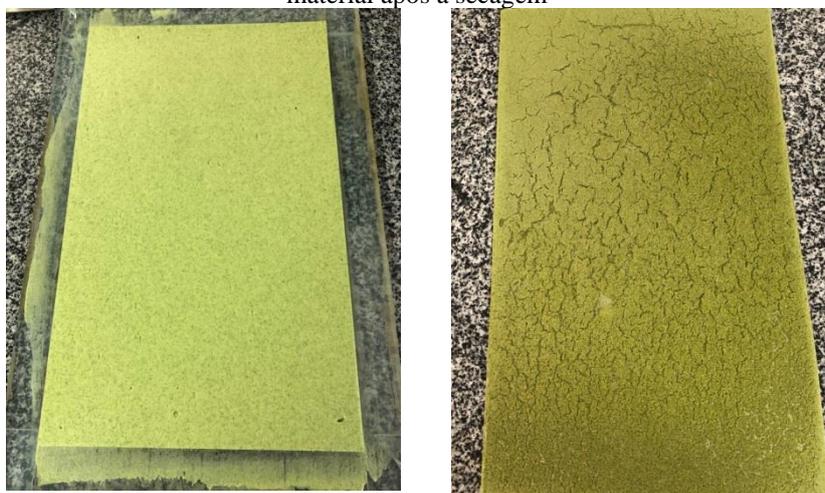
Fonte: A autora (2024)

## 4.2 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

### 4.2.1 Tempo de secagem e umidade de equilíbrio

O processo de secagem foi realizado para todas as condições propostas no planejamento experimental fatorial completo, sendo a perda de umidade acompanhada por pesagem até atingir a umidade de equilíbrio, ou seja, até não haver variação mássica do sistema. Na Figura 18 é mostrada a espuma antes e após a secagem.

**Figura 18** - Secagem da espuma das folhas de Melão de São Caetano: (a) espuma antes da secagem; (b) material após a secagem



(a)

(b)

Fonte: A autora (2024)

O tempo necessário para atingir o equilíbrio foi chamado de tempo final de secagem –  $t_{fsec}$  (min) e seus valores, para cada experimento, podem ser observados na Tabela 10, assim como a umidade de equilíbrio –  $X_f$ , expressa em base seca (b.s), atingida por cada condição do planejamento experimental.

Para as folhas do Melão de São Caetano, o maior tempo de secagem foi de 260 min, nas condições de 7% de concentração do agente espumante, 8 min de agitação e 50 °C (Experimento 4) e o menor tempo foi de 170 min, nas condições de 3% de agente espumante, 8 min de agitação e 70 °C (Experimento 7). O experimento 7 também foi o que apresentou menor tempo de secagem para os frutos, que também durou 170 min. O

maior tempo de secagem para os frutos foi de 280 min, no experimento 2 (7% concentração do agente espumante, 4 min de agitação e 50 °C).

**Tabela 10** - Tempo final de secagem e umidade de equilíbrio das diferentes condições do planejamento experimental da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano

Experimento	Cesp (%)	tag (min)	T (°C)	Folhas		Frutos	
				tfsec (min)	Xf (b.s)	tfsec (min)	Xf (b.s)
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	250	0,08	260	0,03
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	230	0,23	280	0,04
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	220	0,02	230	0,02
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	260	0,15	270	0,01
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	200	0,04	200	0,01
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	220	0,04	190	0,00
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	170	0,00	170	0,00
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	190	0,03	190	0,01
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	210	0,11	190	0,01
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	210	0,05	190	0,01
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	200	0,08	180	0,00

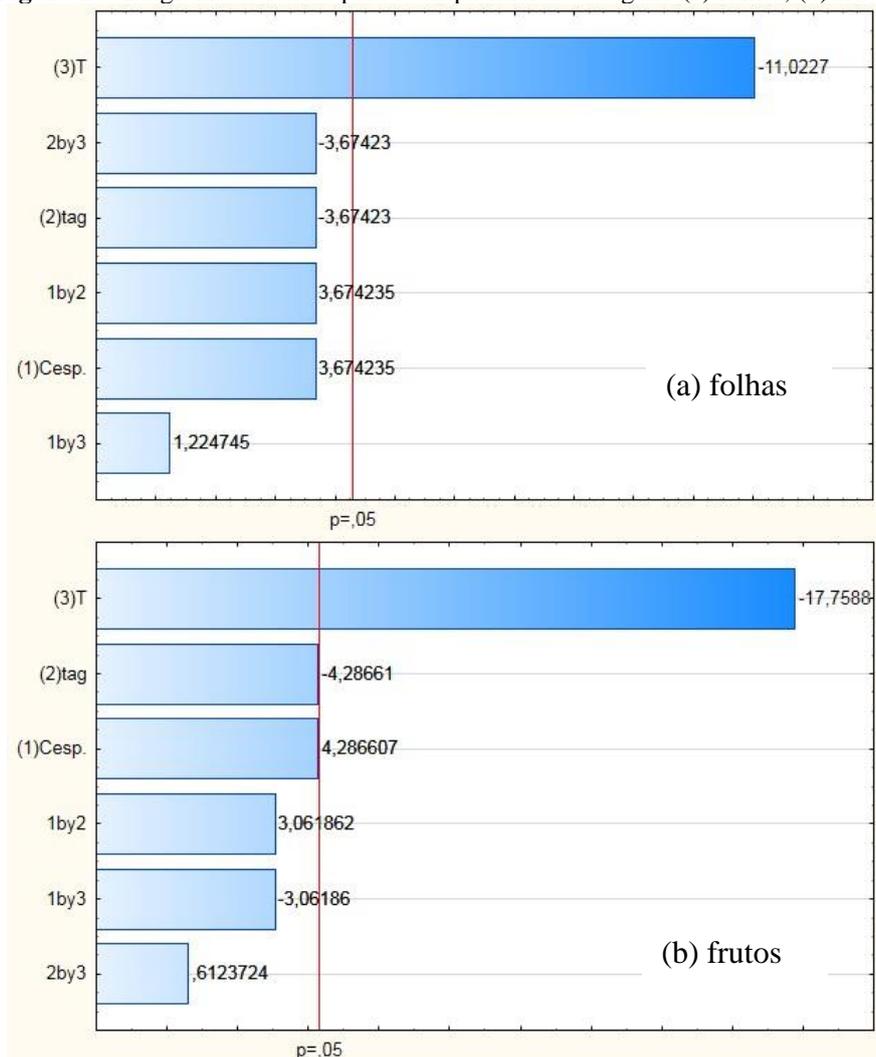
Cesp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura; tfsec – tempo final de secagem; Xf – umidade final da secagem

Fonte: A autora (2024)

Tanto para a secagem das folhas quanto para a secagem dos frutos houve uma redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura, onde os menores tempos de secagem foram obtidos nos experimentos com a temperatura de 70 °C. Para as folhas, houve uma redução de até 26,92% do tempo de secagem com o aumento da temperatura de 50 °C para 70°C, considerando as mesmas condições de produção da espuma. Enquanto para os frutos essa redução chegou a 32,14%. A análise estatística (Figura 19) comprova o efeito da temperatura de secagem (T) sobre o tempo de secagem.

A temperatura de secagem (T), para ambas as matérias primas, foi a única variável com influência estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) sobre o tempo final de secagem (tfsec), apresentando efeito inversamente proporcional, ou seja, o aumento na temperatura de secagem ocasionou uma redução do tempo necessário para o sistema atingir o equilíbrio.

**Figura 19-** Diagrama de Pareto para o tempo final de secagem: (a) folhas; (b) frutos



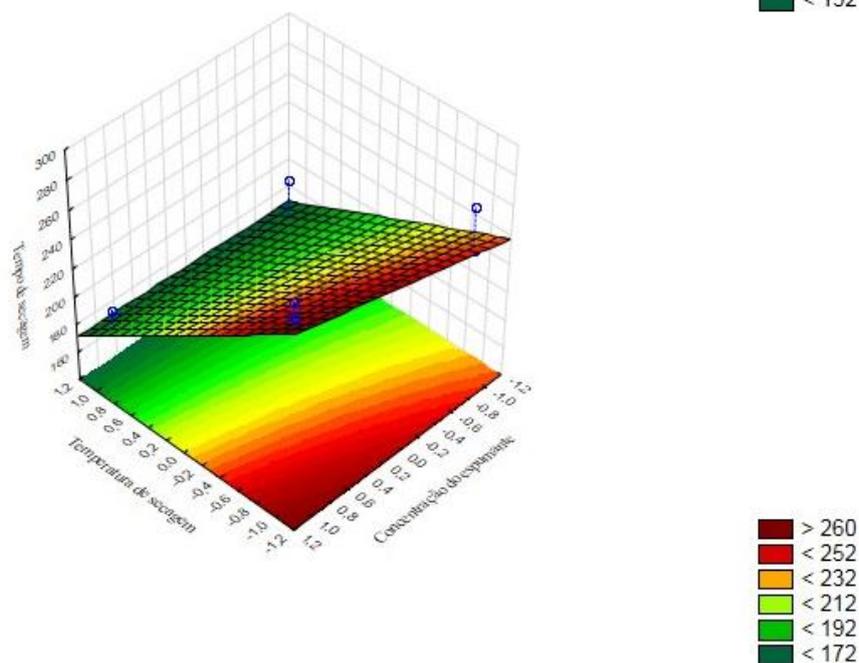
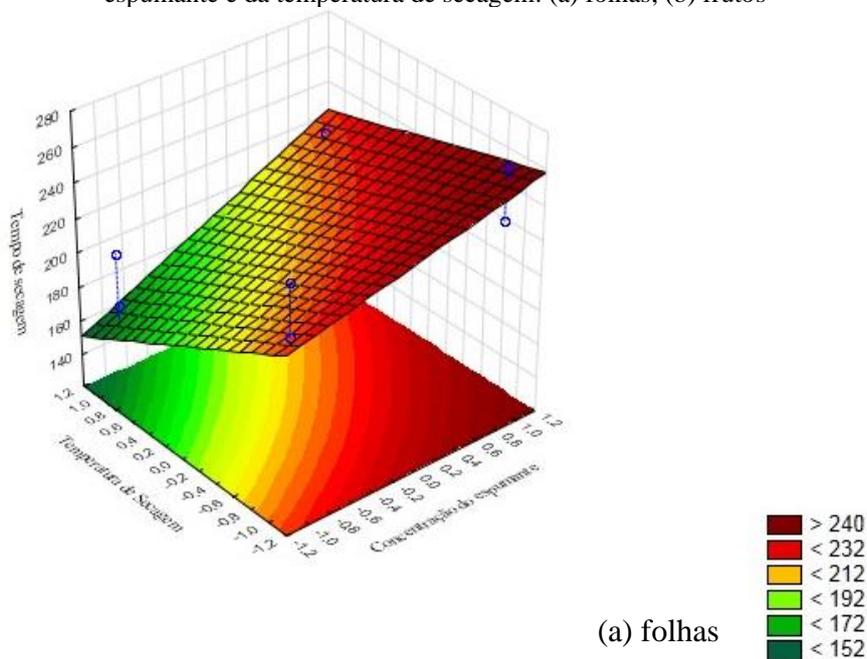
Fonte: A autora (2024)

Estudos anteriores apresentaram comportamento similar, como na secagem em camada de espuma do louro cereja, onde o aumento da temperatura de secagem de 60 °C para 80 °C reduziu em 43,75% o tempo de secagem (Guldane; Bozkir, 2024). Na secagem em camada de espuma do suco de laranja o tempo de secagem reduziu de 280 min para 100 min com o aumento da temperatura de 40 °C para 70 °C (Tabari; Hamzeh, 2024). Kaba *et al.*, (2023) também relataram uma diminuição significativa do tempo de secagem da polpa da cereja da Cornualha (*Cornus mas L.*).

Esse comportamento pode ser atribuído à redução da resistência interna à difusão da água no produto devido ao aumento da temperatura (Guldane; Bozkir, 2024; Macedo *et al.*, 2021). Além do fato de que, o aumento da temperatura aumenta o gradiente de pressão de vapor, aumenta a agitação das moléculas e reduz a viscosidade da água, proporcionando a evaporação da água do produto (Macedo *et al.*, 2021; Bhandari, 2006).

O efeito da temperatura sobre o tempo de secagem também pode ser observado na Figura 20.

**Figura 20** - Superfície de resposta para o tempo de secagem em função da concentração do agente espumante e da temperatura de secagem: (a) folhas; (b) frutos



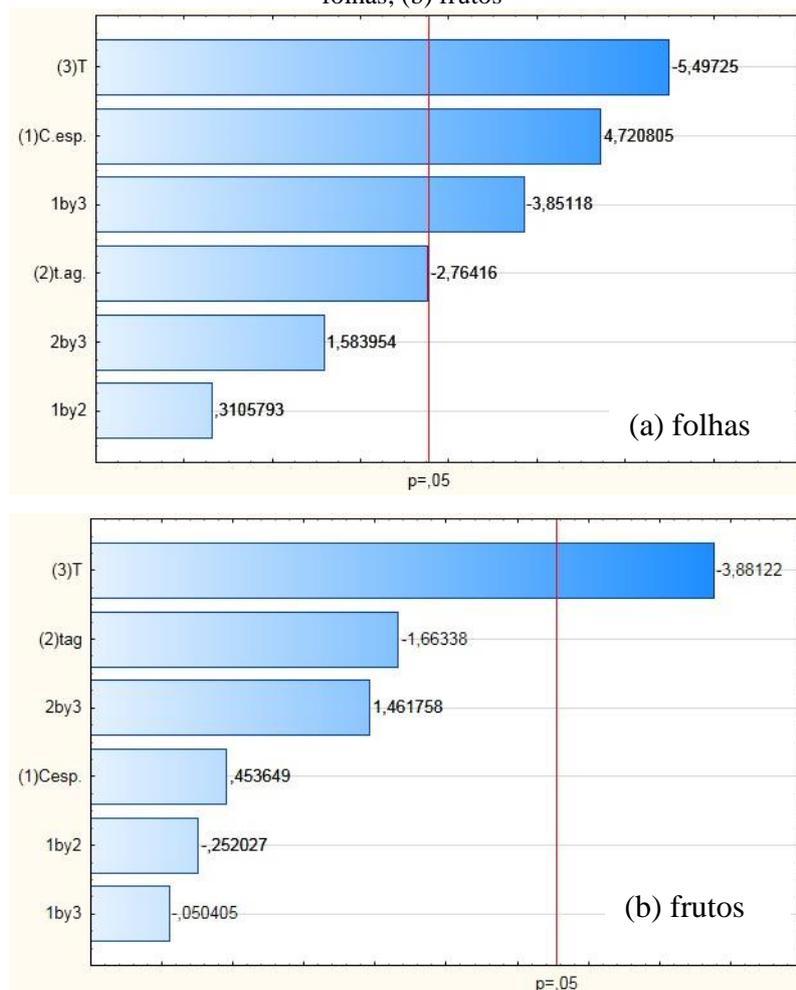
Fonte: A autora (2024)

A umidade de equilíbrio atingida na secagem das folhas variou de 0,00 (b.s), obtida no experimento 7, a 0,23 (b.s), obtida no experimento 2. Para secagem dos frutos a menor umidade de equilíbrio atingida foi de 0,00 (b.s.) nos experimentos 6, 7 e 11. O

maior valor da umidade de equilíbrio também foi obtido no experimento 2 (7% do agente espumante, 4 min de agitação e 50 °C), sendo o valor de 0,04 (b.s).

A análise estatística sobre o efeito das variáveis do processo sobre a umidade de equilíbrio atingida na secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observada na Figura 21.

**Figura 21** - Diagrama de Pareto para a umidade de equilíbrio da secagem em camada de espuma: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

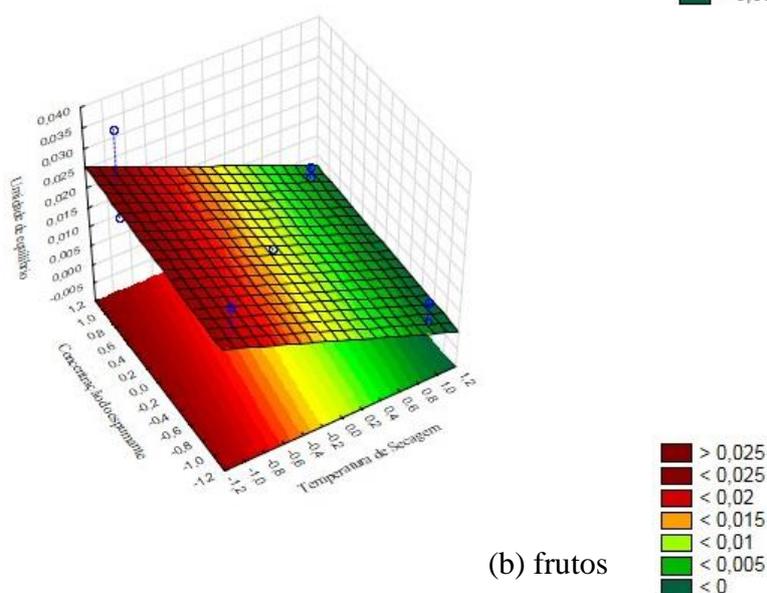
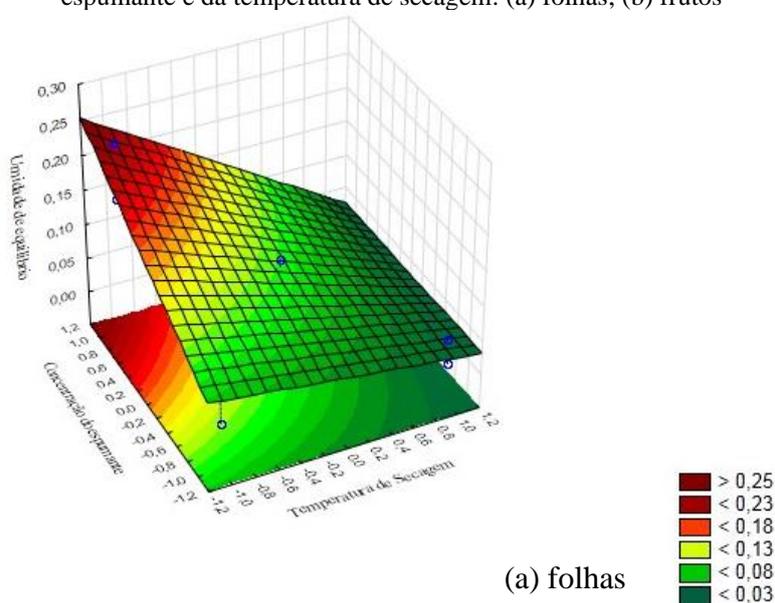
A temperatura de secagem (T) foi a variável que mais afetou, significativamente ( $p<0,05$ ), a umidade final, das folhas e dos frutos, sendo essa influência de sinal negativo, apontando que o aumento na temperatura de secagem resultou na diminuição da umidade de equilíbrio alcançada. Como já citado, o aumento da temperatura favorece a evaporação da água do produto devido à diminuição da resistência interna à difusão da água no produto (Guldane; Bozkir, 2024; Macedo *et al.*, 2021), ao aumento do gradiente de

pressão de vapor, ao aumento da agitação das moléculas e à redução da viscosidade da água (Macedo *et al.*, 2021; Bhandari, 2006), fatos que justificam o resultado obtido.

Além da temperatura, a concentração do agente espumante (Cesp) afetou, de forma significativa ( $p < 0,05$ ), a umidade final alcançada na secagem das folhas, sendo esse efeito de sinal positivo, indicando que maiores umidades de equilíbrio são encontradas quando usado as maiores concentrações do espumante.

Os efeitos da temperatura de secagem e da concentração do agente espumante sobre a umidade de equilíbrio atingida, na secagem das folhas e frutos do Melão de São Caetano, também podem ser observados na Figura 22.

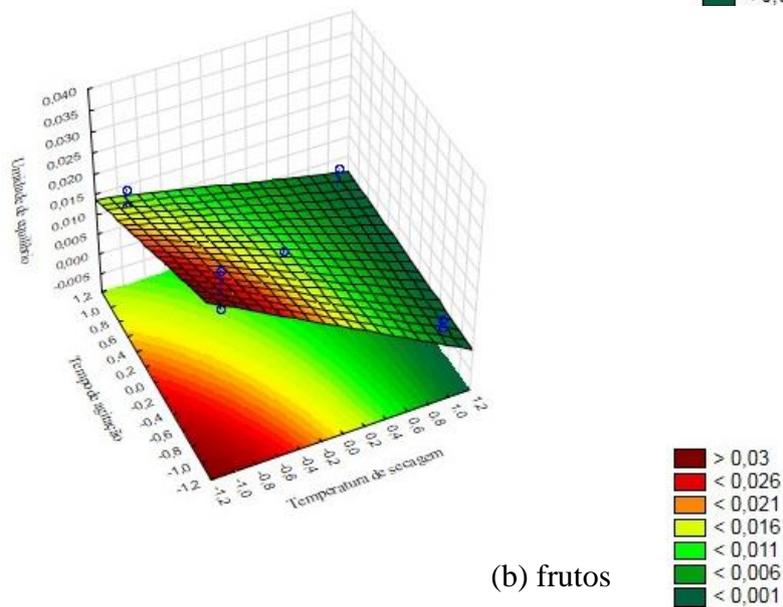
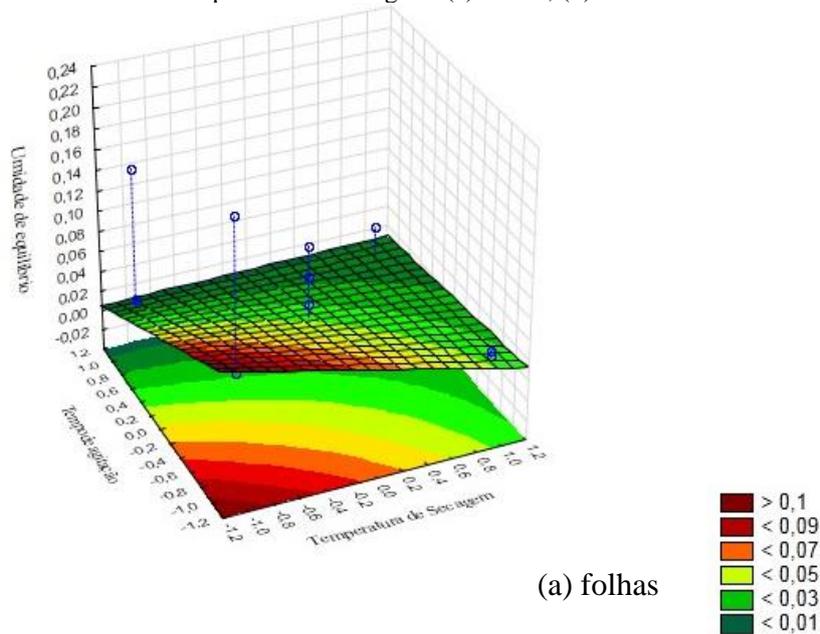
**Figura 22** - Superfície de resposta para a umidade de equilíbrio em função da concentração do agente espumante e da temperatura de secagem: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

Mesmo não afetando a umidade final, dentro do intervalo de significância de 95%, foi observado que há uma tendência de a umidade de equilíbrio reduzir com o aumento do tempo de agitação, para a secagem tanto das folhas quanto dos frutos, como pode ser observado na Figura 23.

**Figura 23** - Superfície de resposta para a umidade de equilíbrio em função do tempo de agitação e da temperatura de secagem: (a) folhas; (b) frutos



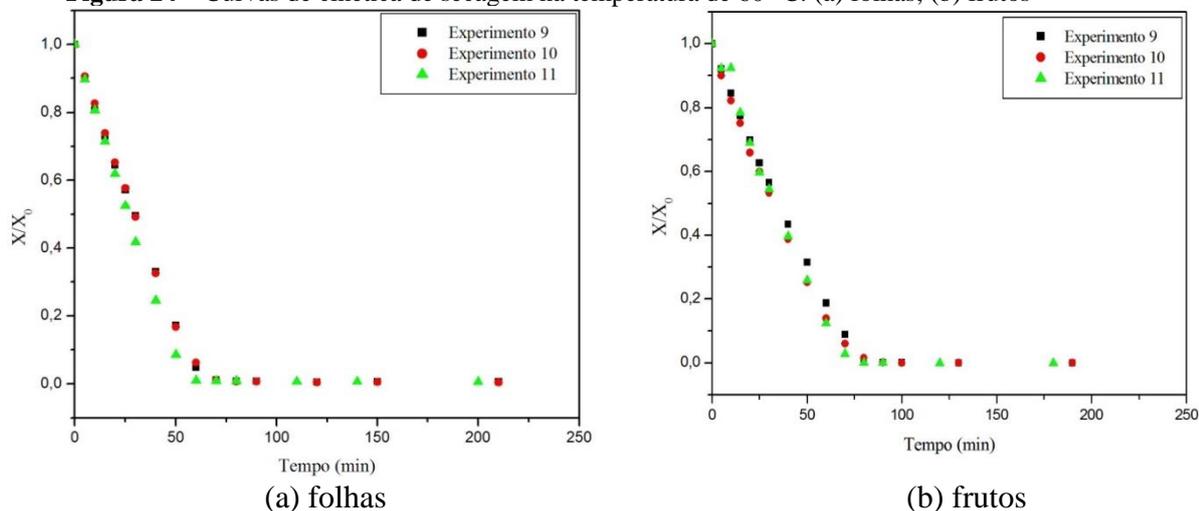
Fonte: A autora (2024)

#### 4.2.2 Cinética e taxa de secagem

A perda de água da espuma foi monitorada e com os dados obtidos foram construídas as curvas de cinética e taxa de secagem para cada experimento, de acordo com o planejamento experimental fatorial completo.

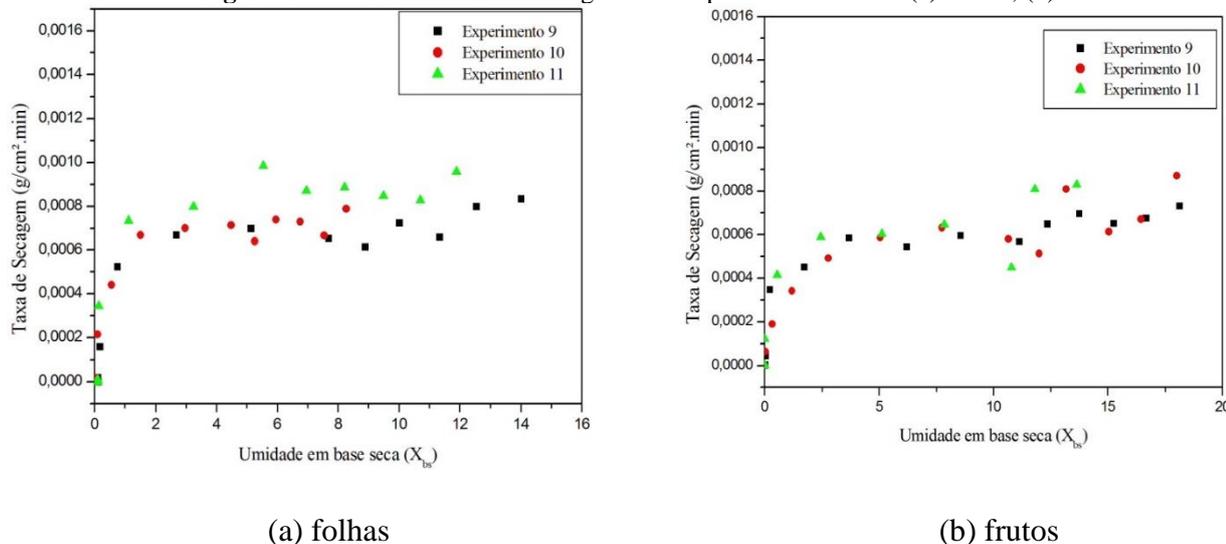
As curvas de cinética e taxa de secagem dos 3 pontos centrais (Experimento 9, 10 e 11), da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, estão representadas nas Figuras 24 e 25, respectivamente, e, como pode ser observado, todas elas apresentaram comportamento muito similares, indicando uma boa reprodutibilidade dos experimentos de secagem.

**Figura 24** – Curvas de cinética de secagem na temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

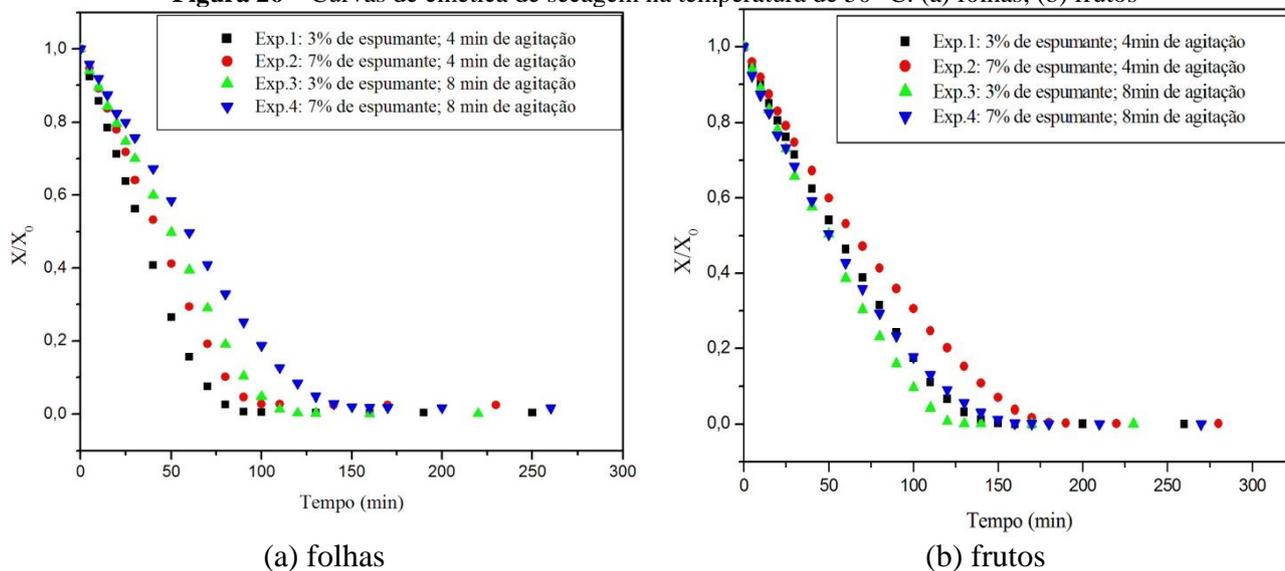
**Figura 25** – Curvas da taxa de secagem na temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

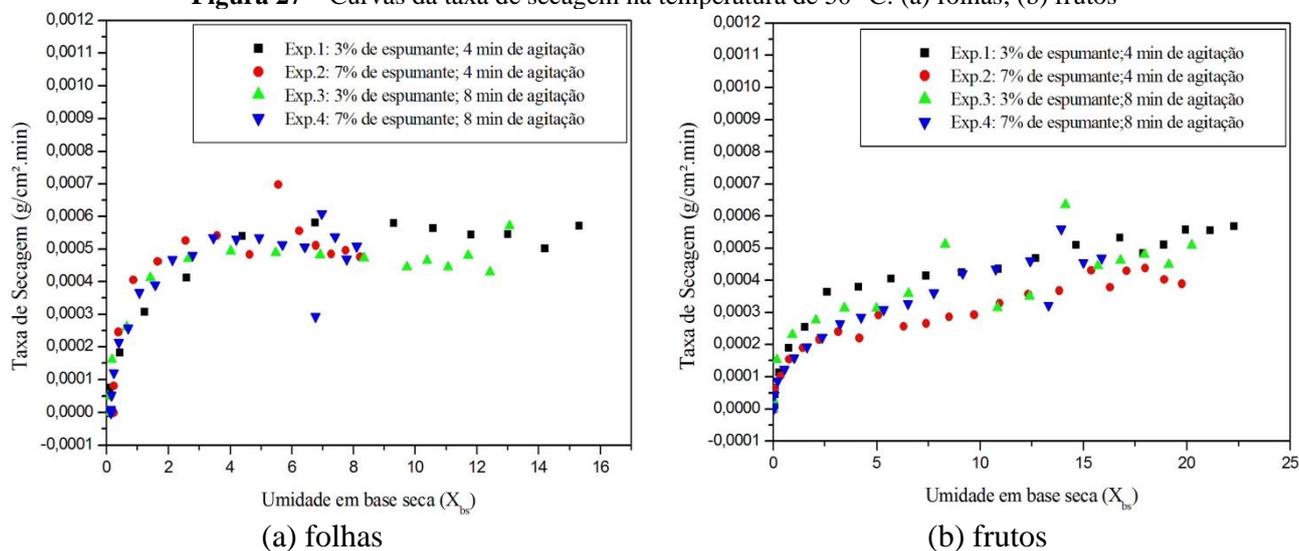
As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, as curvas de cinética e taxa de secagem para as folhas e frutos do Melão de São Caetano, enquanto que as curvas da secagem à 70 °C estão representadas nas Figuras 28 e 29.

**Figura 26** – Curvas de cinética de secagem na temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos

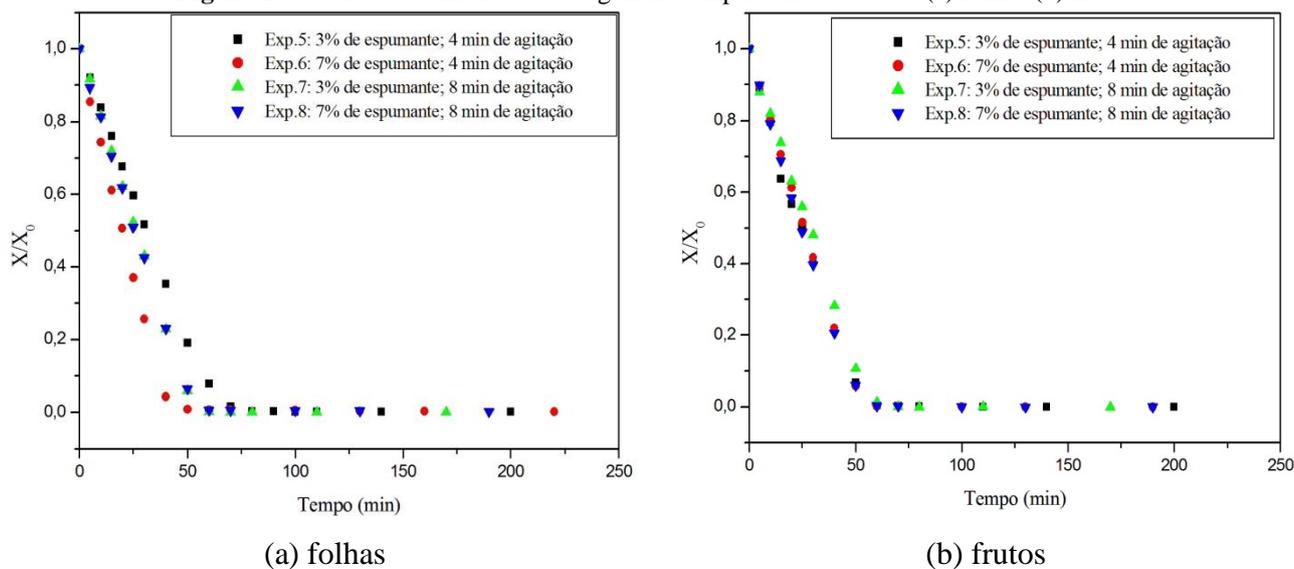


Fonte: A autora (2024)

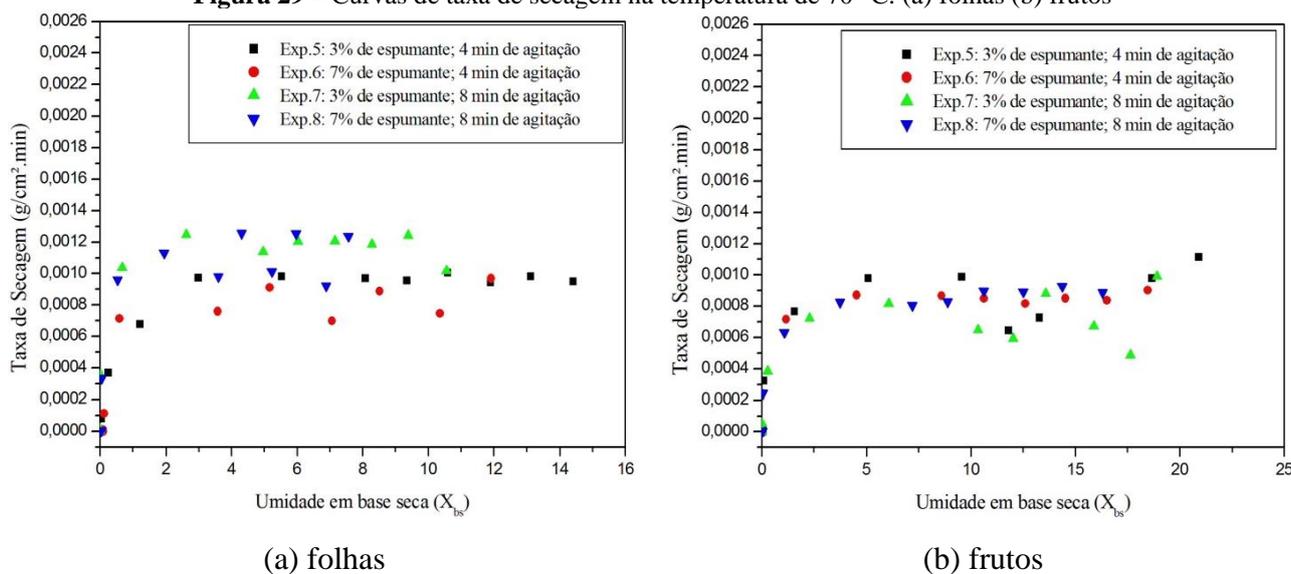
**Figura 27** – Curvas da taxa de secagem na temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 28** – Curvas de cinética de secagem na temperatura de 70 °C: (a) folhas (b) frutos

Fonte: A autora (2024)

**Figura 29** – Curvas de taxa de secagem na temperatura de 70 °C: (a) folhas (b) frutos

Fonte: A autora (2024)

De acordo com as Figuras 24, 25, 26, 27, 29 e 29, percebeu-se que em todas as temperaturas, as curvas de secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, apresentaram comportamentos similares, nas quais ocorre um período de taxa constante seguido por um período de taxa decrescente até ser atingido o equilíbrio. No período de taxa constante, a água está livremente disponível, tendo facilidade para ser transportada por fluxo capilar e difusão de vapor. Durante esse período a pressão de vapor de água na superfície é constante, assim como a temperatura, que se mantém constante igual a

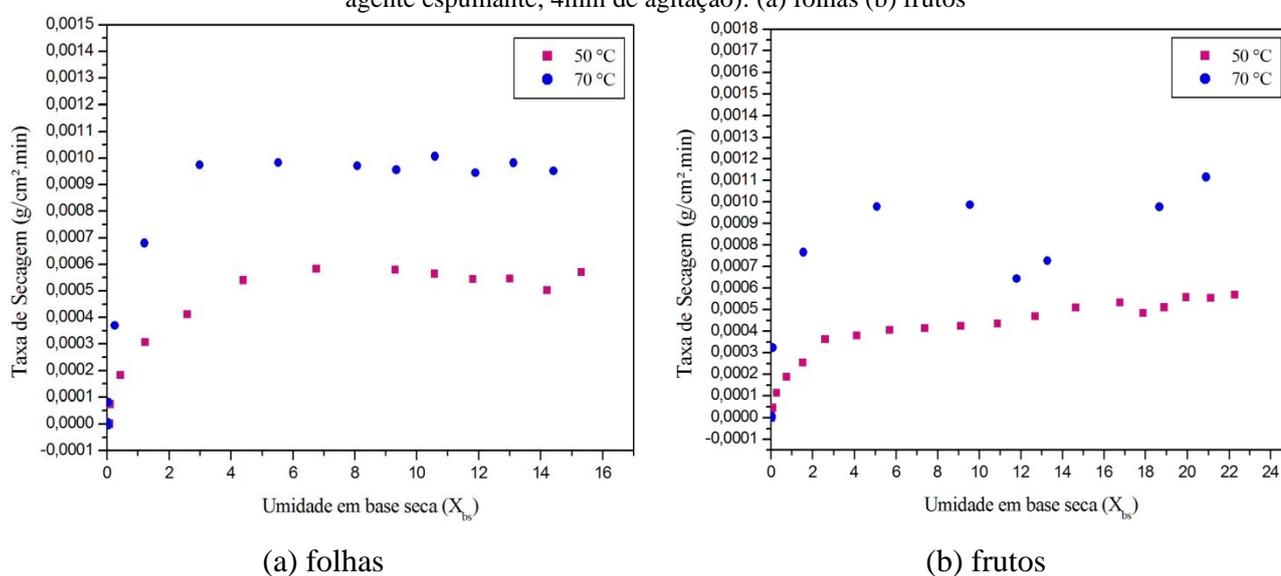
temperatura de bulbo úmido, características que ocorrem devido ao fato de que as transferências de calor e de massa são compensadas, resultando em uma velocidade constante de secagem (Leite *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2014)

É possível perceber que o período de taxa decrescente é mais curto quando comparado com o período de taxa constante. O período de taxa constante ocorre até que umidade no interior do sólido seja muito baixa, reduzindo a difusão da água para a superfície do sólido. Com isto, ocorre o decréscimo na taxa de secagem, pois, a quantidade de energia necessária para vaporizar a água neste período é menor e a temperatura do sólido passa a aumentar (Martins *et al.*, 2020).

Nota-se que os experimentos submetidos à secagem a 70 °C atingiram a umidade de equilíbrio mais rápido do que os experimentos a 50 °C. Maiores temperaturas ocasionam uma maior transferência de calor entre a camada de espuma e o ar, causando uma maior evaporação de água do produto, o que resulta em uma redução do teor de água e do tempo de operação (Leite *et al.*, 2023).

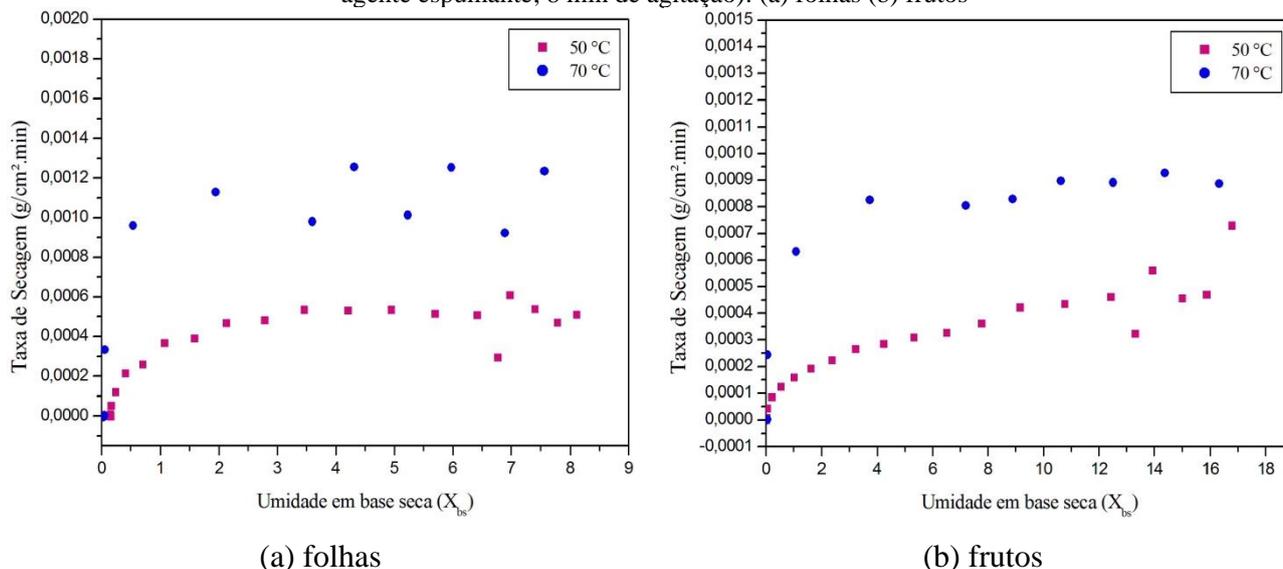
Também foi observado que as taxas de secagem a 70 °C são superiores as de 50 °C, fato melhor evidenciado nas Figuras 30 e 31.

**Figura 30** – Comparativo das curvas de secagem nas condições mínimas de produção da espuma (3% agente espumante; 4min de agitação): (a) folhas (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 31** – Comparativo das curvas de secagem nas condições máximas de produção da espuma (7% agente espumante; 8 min de agitação): (a) folhas (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

Com a análise das curvas das Figuras 30 e 31 foi observado que na temperatura de 70 °C há um aumento significativo da taxa de secagem, quando comparado à temperatura de 50 °C, enfatizando a influência da temperatura sobre a velocidade de remoção da umidade do material, o que justifica os menores tempos de secagem para a temperatura de 70 °C. Essa influência também foi observada na secagem em camada de espuma do suco de limão, onde a taxa média de secagem aumentou 20,23% com o aumento da temperatura de 50 °C para 70 °C (Dehghannya *et al.*, 2019). Outros estudos de secagem em camada de espuma também relataram o aumento da taxa de secagem com o aumento da temperatura, como na secagem da *Mentha crisper* (Leite *et al.*, 2023) e da polpa do umbu (Souza *et al.*, 2021).

Tal comportamento é explicado pela influência da temperatura sobre o potencial de transferência de água do sólido para o ar de secagem, visto que, o aquecimento do ar em temperaturas mais elevadas ocasiona a redução de sua umidade relativa, afetando diretamente o potencial de transferência de massa (Leite *et al.*, 2023; Fernandes *et al.*, 2013).

Com as curvas, observou-se que a secagem das folhas alcançou maiores taxas de secagem, o que justifica os menores tempos de secagem para as folhas, como apresentado na Tabela 10.

### 4.3 AJUSTES MATEMÁTICOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano foi realizado utilizando, como critérios de seleção dos modelos, a análise estatística, onde foi verificado se o modelo apresenta coeficientes estatisticamente significativos, e a verificação do ajuste satisfatório, através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro padrão da estimativa (S).

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, os experimentos foram agrupados por temperatura. Na Tabela 11 são mostrados os resultados obtidos do ajuste dos modelos matemáticos para os experimentos de secagem na temperatura de 50 °C.

**Tabela 11** - Ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano a 50 °C

Modelo	Melão de São Caetano	Parâmetros dos modelos matemáticos					
		k	n	a	b	R <sup>2</sup>	S
Newton	Folhas	0,01829	-	-	-	0,93283	0,09571
	Frutos	0,01513	-	-	-	0,96003	0,07102
Page	Folhas	0,00297	1,45384	-	-	0,96082	0,07319
	Frutos	0,00347	1,34447	-	-	0,98047	0,04964
Page Modificado*	Folhas	0,00193	1,55014	0,96937	-	0,96153	0,07242
	Frutos	0,00197	1,46369	0,95826	-	0,98177	0,04796
Henderson e Pabis	Folhas	0,02018	-	1,09049	-	0,94215	0,08881
	Frutos	0,01631	-	1,07118	-	0,96622	0,06529
Midilli, Kucuk e Yapar	Folhas	0,00185 <sup>NS</sup>	1,5628	0,96813	0,00003 <sup>NS</sup>	0,96157	0,07238
	Frutos	0,00244	1,40763	0,96448	- 0,00011 <sup>NS</sup>	0,98231	0,04724

NS= não significativo

\* Modificado por Mangueira (2020)

Fonte: A autora (2024)

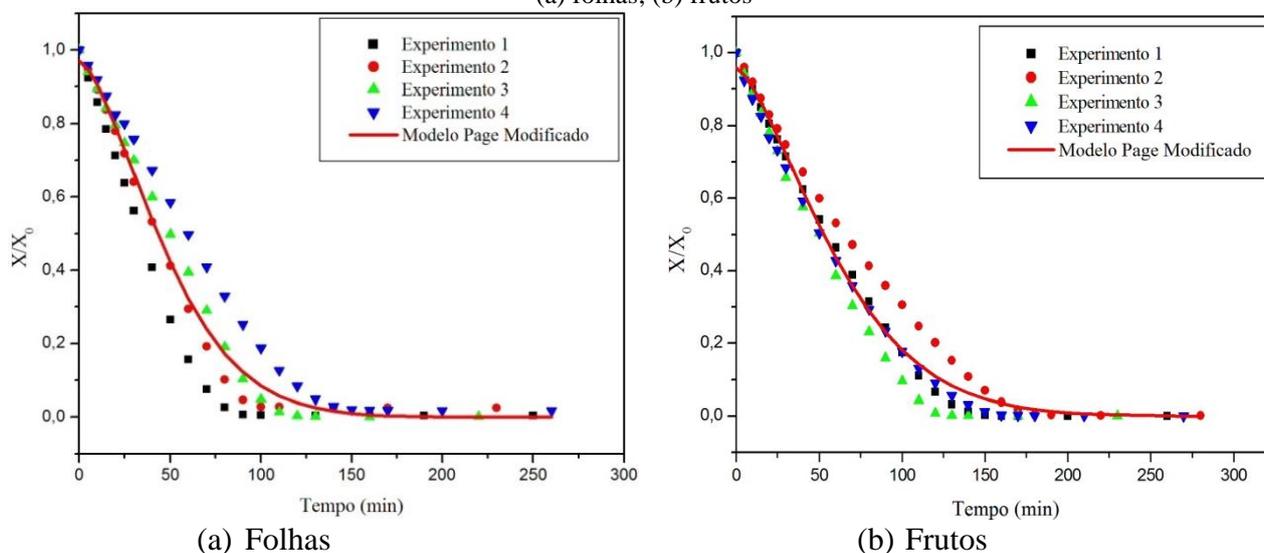
Pela Tabela 11, foi observado que o modelo de Midilli, Kucuk e Yapar não tem ajuste aos dados experimentais, tanto para a secagem das folhas quanto para a secagem dos frutos do Melão de São Caetano, pois seus coeficientes não foram estatisticamente significativos, para o nível de confiança de 95%.

Tanto para a secagem das folhas quanto para a secagem dos frutos, o melhor ajuste para a temperatura de 50 °C foi do modelo de Page modificado, pois apresentou o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e menor erro padrão da estimativa ( $S$ ), com os valores de  $R^2$  de 0,96153 e 0,98177 e os de  $S$  de 0,07242 e 0,04796, respectivamente para a secagem das folhas e dos frutos.

O segundo melhor ajuste, para as duas matérias primas, foi para o modelo de Page, onde os valores de  $R^2$  foram de 0,96082 e 0,98047 e de  $S$  foram de 0,07319 e 0,04964, para as folhas e frutos respectivamente.

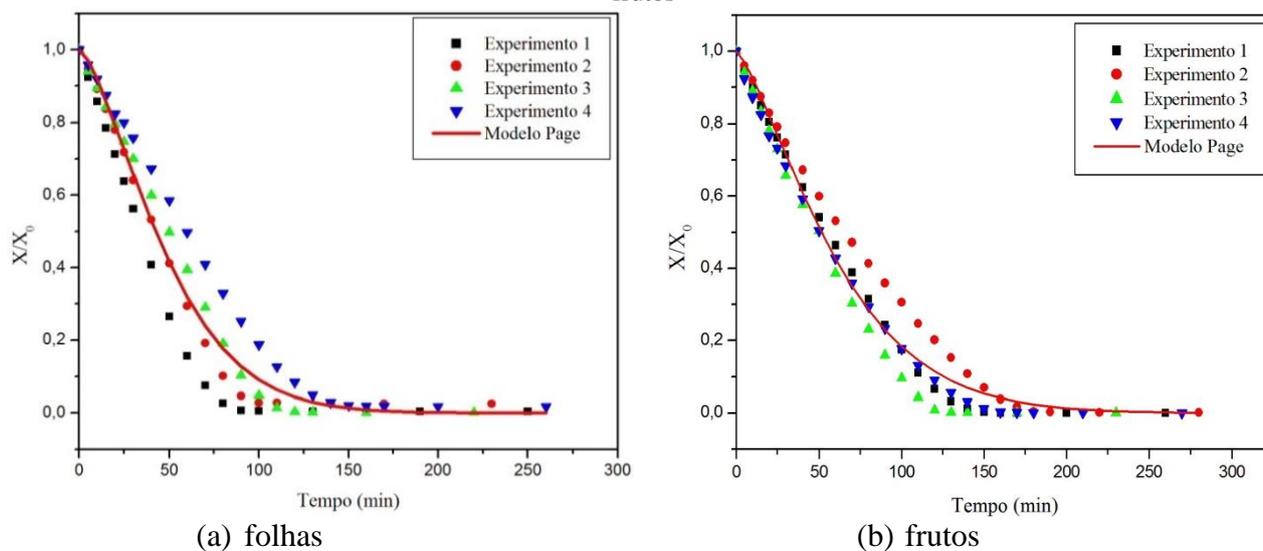
Nas Figuras 32 e 33 são mostradas as curvas de cinética de secagem e dos ajustes dos modelos de Page modificado e Page, para os experimentos de secagem à 50 °C.

**Figura 32** - Ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais para temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 33** - Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais para temperatura de 50 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

Com a obtenção dos coeficientes estatisticamente significativos foram geradas as equações dos ajustes dos modelos, que podem ser observados na Tabela 12.

**Tabela 12** - Equações dos modelos ajustados aos dados das cinéticas de secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano para a temperatura de 50 °C

Modelo	Melão de São Caetano	Representação matemática ajustada
Newton	Folhas	$RU = \exp(-0,01829.t)$
	Frutos	$RU = \exp(-0,01513.t)$
Page	Folhas	$RU = \exp(-0,00297.t^{1,45384})$
	Frutos	$RU = \exp(-0,00347.t^{1,34447})$
Page Modificado	Folhas	$RU = 0,96987.\exp(-0,00193.t^{1,55014})$
	Frutos	$RU = 0,95826.\exp(-0,00197.t^{1,46369})$
Henderson e Pabis	Folhas	$RU = 1,09049.\exp(-0,02018.t)$
	Frutos	$RU = 1,07118.\exp(-0,01631.t)$

Fonte: A autora (2024)

Na Tabela 13 são mostrados os resultados obtidos para o ajuste dos modelos matemáticos para os experimentos de secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano na temperatura de 70 °C.

**Tabela 13** - Ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano a 70 °C

Modelo	Melão de São Caetano	Parâmetros dos modelos matemáticos					
		k	n	a	b	R <sup>2</sup>	S
Newton	Folhas	0,03298	-	-	-	0,94166	0,08854
	Frutos	0,03277	-	-	-	0,95553	0,07758
Page	Folhas	0,00499	1,55414	-	-	0,97479	0,05866
	Frutos	0,00492	1,55477	-	-	0,98997	0,03684
Page Modificado*	Folhas	0,00312	1,67684	0,96237	-	0,97581	0,05746
	Frutos	0,00272	1,70876	0,95415	-	0,99157	0,03377
Henderson e Pabis	Folhas	0,02018	-	1,09049	-	0,95032	0,08231
	Frutos	0,03578	-	1,08500	-	0,98196	0,07048
Midilli, Kucuk e Yapar	Folhas	0,00316	1,67209	0,96277	0,00002 <sup>NS</sup>	0,97546	0,05742
	Frutos	0,00283	1,69580	0,95521	-0,00006 <sup>NS</sup>	0,99171	0,03349

NS= não significativo

\* Modificado por Manguera (2020)

Fonte: A autora (2024)

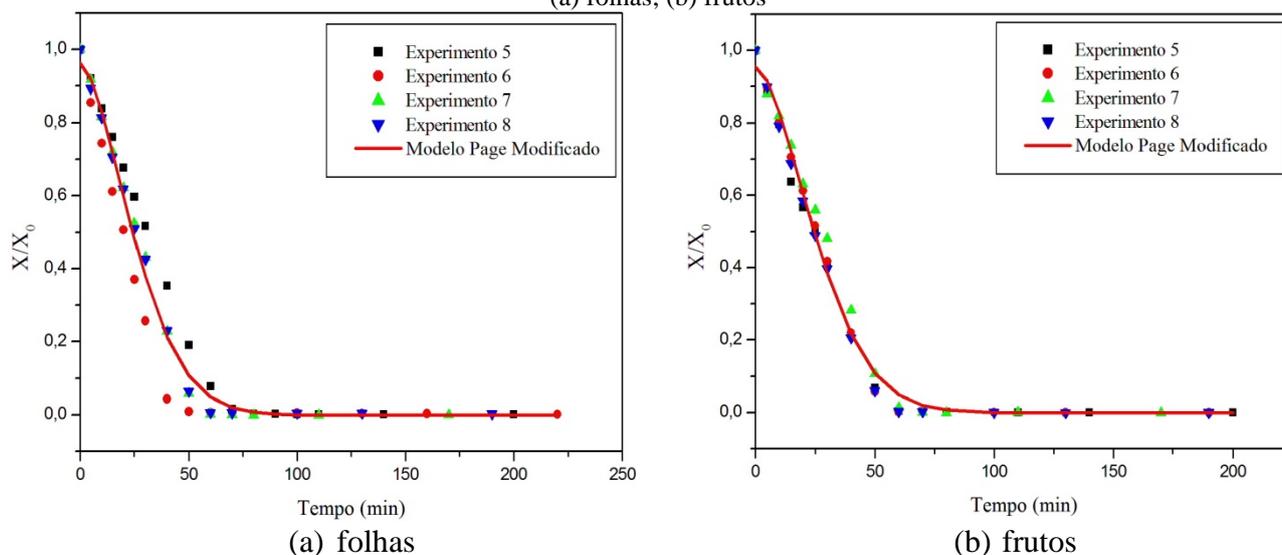
Para os experimentos de secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano na temperatura de 70 °C o modelo de Midilli, Kucuk e Yapar também não apresentou coeficientes estatisticamente significativos, para o nível de confiança de 95%. Para essa temperatura o modelo de Page modificado também apresentou os melhores ajustes para a secagem das folhas e dos frutos, apresentando os valores de R<sup>2</sup> de 0,97581 e 0,99157 e de S de 0,05746 e 0,03377, respectivamente para as folhas e frutos.

O modelo de Page apresentou o segundo melhor ajuste para os dados experimentais da secagem das folhas e dos frutos, sendo os valores de  $R^2$  de 0,97479 e 0,98997 e os de S de 0,05866 e 0,03684, respectivamente para a secagem das folhas e dos frutos.

Nas Figuras 34 e 35 são mostradas as curvas de cinética de secagem e de ajuste dos dois modelos que apresentaram os melhores ajustes para a temperatura de 70 °C.

**Figura 34** - Ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais para temperatura de 70 °C:

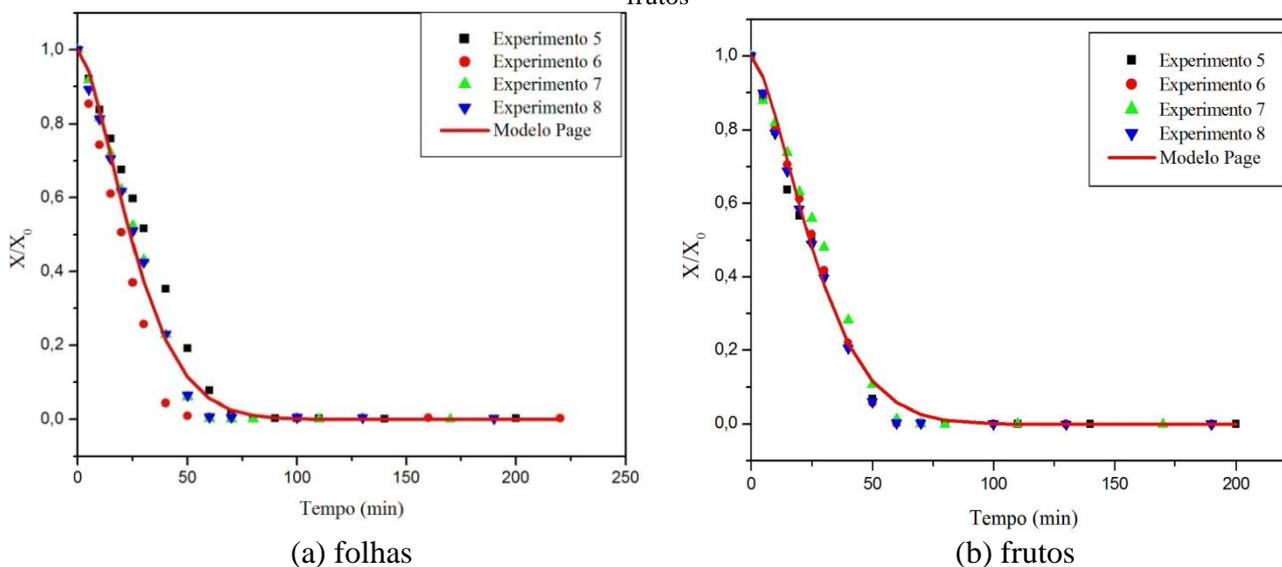
(a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 35** - Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais para temperatura de 70 °C: (a) folhas; (b)

frutos



Fonte: A autora (2024)

Na Tabela 14 são mostradas as equações dos modelos que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos para os experimentos de secagem a 70 °C.

**Tabela 14** - Equações dos modelos que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos para os dados das cinéticas de secagem das folhas e frutos do Melão de São Caetano para a temperatura de 70 °C

<b>Modelo</b>	<b>Melão de São Caetano</b>	<b>Representação matemática ajustada</b>
Newton	Folhas	$RU = \exp(-0,03298.t)$
	Frutos	$RU = \exp(-0,03277.t)$
Page	Folhas	$RU = \exp(-0,00499.t^{1,55414})$
	Frutos	$RU = \exp(-0,00492.t^{1,55477})$
Page Modificado	Folhas	$RU = 0,9624.\exp(-0,00312.t^{1,6768})$
	Frutos	$RU = 0,95415.\exp(-0,00272.t^{1,70876})$
Henderson e Pabis	Folhas	$RU = 1,09049.\exp(-0,02018.t)$
	Frutos	$RU = 1,08500.\exp(-0,03578.t)$

Fonte: A autora (2024)

Na Tabela 15 são mostrados os resultados obtidos para o ajuste dos modelos matemáticos para os experimentos de secagem na temperatura de 60 °C.

O modelo de Midilli, Kucuk e Yapar também não apresentou coeficientes estatisticamente significativos, no nível de confiança de 95%, para os experimentos de secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano a 60 °C.

O modelo de Page modificado novamente apresentou os maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ), 0,99297 e 0,99304, e os menores valores do erro padrão da estimativa (S), 0,0309 e 0,03089, respectivamente para as folhas e frutos, sendo, portanto, o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano na temperatura de 60 °C.

**Tabela 15** - Ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano a 60 °C

Modelo	Melão de São Caetano	Parâmetros dos modelos matemáticos					
		k	n	a	B	R <sup>2</sup>	S
Newton	Folhas	0,02979	-	-	-	0,95832	0,07522
	Frutos	0,02519	-	-	-	0,95627	0,07743
Page	Folhas	0,00449	1,53852	-	-	0,99149	0,03399
	Frutos	0,00387	1,50799	-	-	0,99183	0,03347
Page Modificado*	Folhas	0,00251	1,68589	0,95526	-	0,99297	0,0309
	Frutos	0,00235	1,62799	0,96126	-	0,99304	0,03089
Henderson e Pabis	Folhas	0,03262	-	1,08735	-	0,96631	0,06762
	Frutos	0,02775	-	1,09197	-	0,96607	0,06821
Midilli, Kucuk e Yapar	Folhas	0,00253	1,68274	0,95552	-0,00001 <sup>NS</sup>	0,99297	0,03088
	Frutos	0,00256	1,60045	0,96367	-0,00011 <sup>NS</sup>	0,99337	0,03015

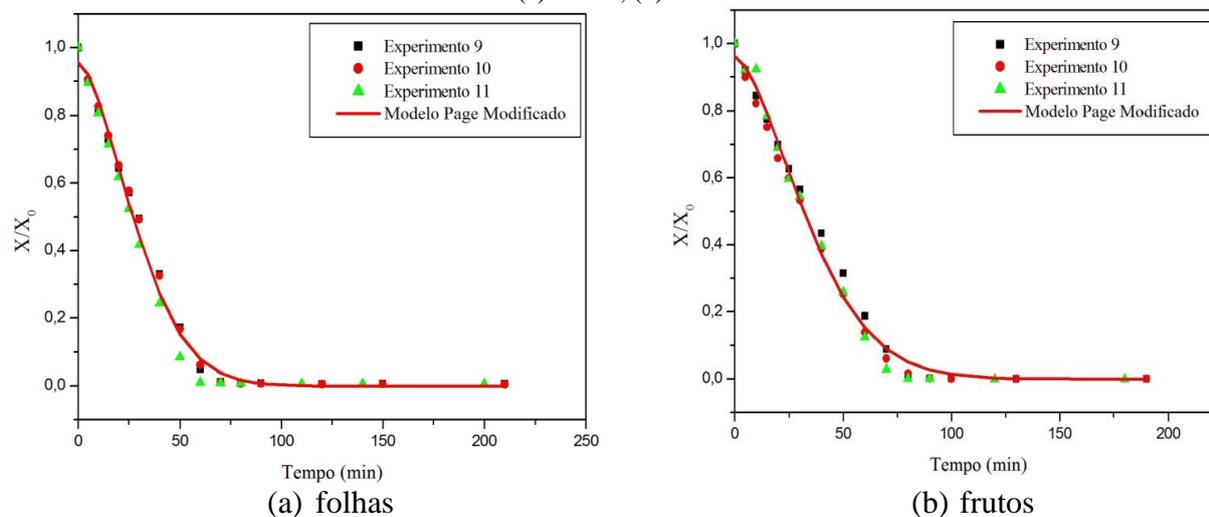
NS= não significativo

\* Modificado por Mangueira (2020)

Fonte: A autora (2024)

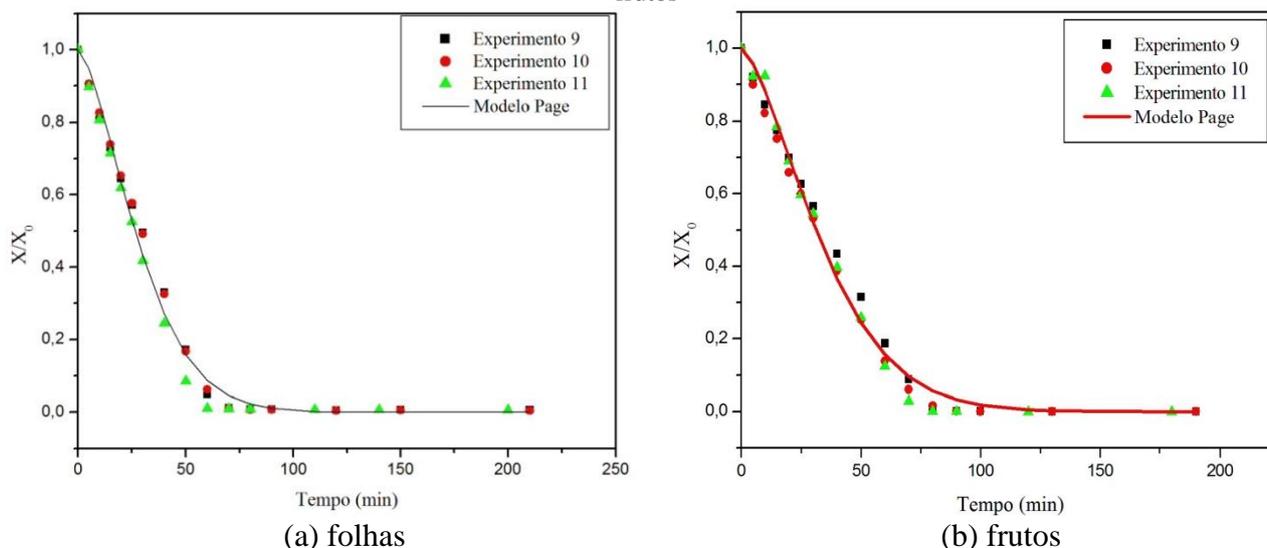
Nas Figuras 36 e 37 são mostradas as curvas de cinética de secagem e de ajuste dos dois modelos que apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais da secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano na temperatura de 60 °C.

**Figura 36** - Ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais para temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

**Figura 37** - Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais para temperatura de 60 °C: (a) folhas; (b) frutos



Fonte: A autora (2024)

Na Tabela 16 são mostradas as equações dos modelos que obtiveram coeficientes estatisticamente significativos para os experimentos de secagem a 60 °C.

De forma geral, tanto para a secagem das folhas quanto para a secagem dos frutos, os modelos matemáticos estudados apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, com coeficientes de determinação superiores a 0,9328 e com erro padrão da estimativa inferiores a 0,0957, exceto o modelo de Midilli, Kucuk e Yapar, no qual os coeficientes não foram estatisticamente significativos ( $p < 0,05$ ) para nenhuma das matérias primas e nenhuma das temperaturas estudadas.

**Tabela 16** - Equações dos modelos que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos para a secagem das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano na temperatura de 60 °C

Modelo	Melão de São Caetano	Representação matemática ajustada
Newton	Folhas	$RU = \exp(-0,02979.t)$
	Frutos	$RU = \exp(-0,02519.t)$
Page	Folhas	$RU = \exp(-0,00449.t^{1,53852})$
	Frutos	$RU = \exp(-0,00387.t^{1,50799})$
Page Modificado	Folhas	$RU = 0,95526.\exp(-0,00251.t^{1,68589})$
	Frutos	$RU = 0,96126.\exp(-0,00235.t^{1,62799})$
Henderson e Pabis	Folhas	$RU = 1,08735.\exp(-0,03262.t)$
	Frutos	$RU = 1,09197.\exp(-0,02775.t)$

Fonte: A autora (2024)

Em todas as temperaturas utilizadas (50, 60 e 70 °C), dentre os modelos matemáticos estudados, o de Page modificado foi o que melhor descreveu o processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, diante das condições utilizadas. O modelo que apresentou o segundo melhor ajuste foi o de Page. Em outros estudos de secagem em camada de espuma os modelos de Page e Page modificado também apresentaram melhores ajustes aos dados experimentais, como na secagem em camada de espuma da folha do noni (*Morinda citrifolia* L.) (Lima *et al.*, 2024), da hortlã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*) (Leite *et al.*, 2023) e na secagem em camada de espuma da folha da gravioleira (Oliveira *et al.*, 2020).

O coeficiente  $k$  representa o efeito das condições externas de secagem e o coeficiente  $n$  representa a resistência interna do material à secagem (Misra; Brooker, 1980). Na secagem das duas matérias primas e em todas as temperaturas estudadas é possível observar que todos os modelos apresentaram valores de  $k$  significativamente inferiores aos valores de  $n$ , indicando que a secagem depende, majoritariamente, da resistência interna do material à secagem.

Também foi possível observar um aumento no valor  $k$  com o aumento da temperatura de secagem, em todos os modelos estudados. Esse aumento reforça o efeito da temperatura de secagem sobre o processo e já foi observado em estudos anteriores, como na secagem em camada de espuma da hortlã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*) (Leite *et al.*, 2023), na secagem em camada de espuma das folhas da gravioleira (Oliveira *et al.*, 2020) e na secagem em camada delgada dos frutos de amendoim (Araujo *et al.*, 2017).

#### 4.4 COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Na Tabela 17 é possível observar os valores dos coeficientes de difusão efetivos, para as temperaturas estudadas, da secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano.

**Tabela 17** – Coeficientes de difusão efetivos para a secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano

Melão de São Caetano	T (°C)	Def (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	S
Folhas	50	6,073 x 10 <sup>-10</sup>	0,873	0,132
	60	1,001 x 10 <sup>-9</sup>	0,905	0,113
	70	1,108 x 10 <sup>-9</sup>	0,892	0,121
Frutos	50	5,077 x 10 <sup>-10</sup>	0,904	0,110
	60	8,411 x 10 <sup>-10</sup>	0,895	0,120
	70	1,099 x 10 <sup>-9</sup>	0,903	0,115

Fonte: A autora (2024)

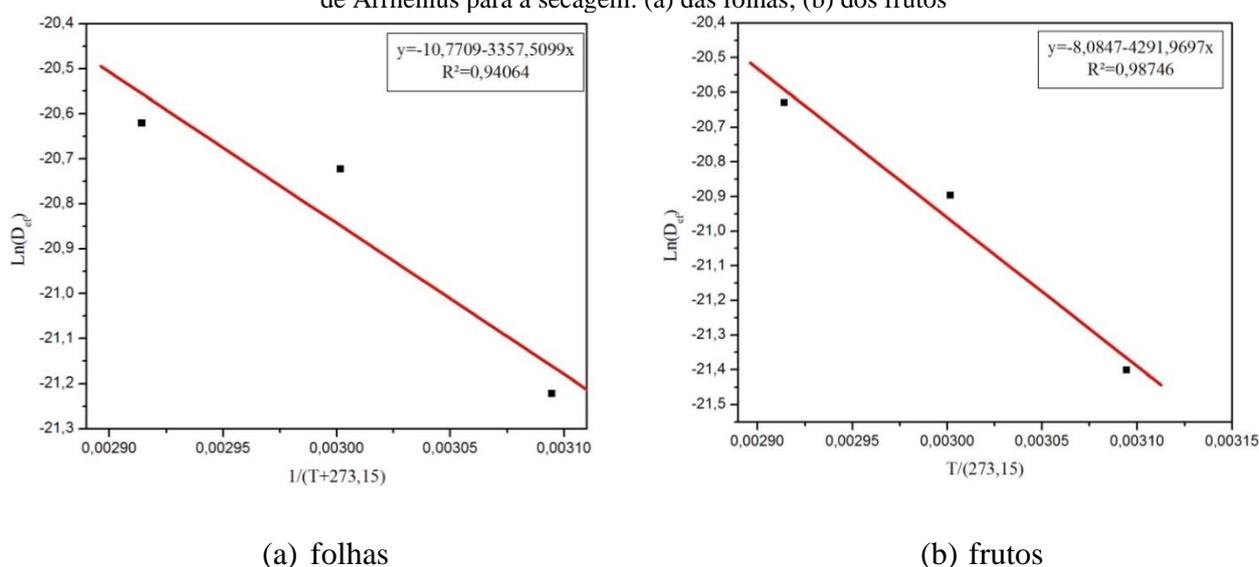
No geral, o valor do coeficiente de difusão efetivo variou de 8,411 x 10<sup>-10</sup> a 1,001 x 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s, ficando situado na faixa relatada por Madamba *et al.* (1996) para materiais agrícolas, que é de 10<sup>-11</sup> a 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s. Na secagem de outros materiais agrícolas também foi observado valores do coeficiente de difusão dentro da faixa citada, como na secagem em camada de espuma do suco do louro cereja, onde o coeficiente de difusão variou de 6,09 x 10<sup>-9</sup> a 11,33 x 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s (Guldane; Bozkir, 2024) e na secagem em camada de espuma das folhas de magenta (*Peristrophe roxburghiana*), cujo coeficiente de difusão variou de 2,27 x 10<sup>-10</sup> a 6,71 x 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s (Thuy *et al.*, 2022).

Percebeu-se que à medida que a temperatura de secagem aumenta ocorreu um aumento no coeficiente de difusão. Para a secagem das folhas o incremento do coeficiente de difusão foi de 82,46% ao aumentar a temperatura de 50 °C para 70 °C. Para a secagem dos frutos esse incremento chegou à 116% quando comparado a menor e a maior temperatura de secagem estudada.

O aumento do coeficiente de difusão com o aumento da temperatura também foi observado por outros pesquisadores, em diferentes tipos de secagem, como na secagem de fatias de maçã (El-Mesery *et al.*, 2024), na secagem do fructus aurantii (Bai *et al.*, 2024), na secagem em camada de espuma do suco do louro cereja (Guldane; Bozkir, 2024), na secagem em camada de espuma das folhas de magenta (*Peristrophe roxburghiana*) (Thuy *et al.*, 2022), na secagem das sementes de tamarindo (*Tamarindus indica* L.) (Ferreira Júnior *et al.*, 2021), na secagem das rodela de banana (Tunckal; Doymaz, 2020) e na secagem das fatias de acuri (Santos *et al.*, 2019a). Tal comportamento se deve ao fato de que o aumento da temperatura de secagem acelera a energia cinética das moléculas e reduz a viscosidade da água, ocasionando a diminuição da resistência do fluido ao escoamento (Ferreira Júnior *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2019a).

A dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura é representada pela equação de Arrhenius. Na Figura 38 é representada a linearização da equação de Arrhenius para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano.

**Figura 38** – Coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura a partir da linearização da equação de Arrhenius para a secagem: (a) das folhas; (b) dos frutos



Fonte: A autora (2024)

A partir das equações das retas representadas na Figura 38 foi possível determinar as equações de Arrhenius linearizadas da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, que podem ser observadas na Tabela 18.

**Tabela 18** – Equação de Arrhenius linearizada para a secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano

Melão de São Caetano	Equação de Arrhenius linearizada
Folhas	$\ln(D_{ef}) = -10,7709 - 3357,5099 * \frac{1}{(T + 273,15)}$
Frutos	$\ln(D_{ef}) = -8,0847 - 4291,9667 * \frac{1}{(T + 273,15)}$

Fonte: A autora (2024)

A partir da equação linearizada de Arrhenius foi possível calcular a energia de ativação ( $E_a$ ) e então calcular a entalpia ( $\Delta H$ ), a entropia ( $\Delta S$ ) e a energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) da secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, os valores obtidos podem ser observados na Tabela 19.

**Tabela 19** – Energia de ativação e propriedades termodinâmicas para a secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano

Melão de São Caetano	T (°C)	Ea (kJ/mol)	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta S$ (kJ/mol K)	$\Delta G$ (kJ/mol)
Folhas	50		25,2276	-0,3351	133,5236
	60	27,9143	25,1444	-0,3354	136,8761
	70		25,0613	-0,3356	140,2311
Frutos	50		32,9970	-0,3128	134,0758
	60	35,6837	32,9139	-0,3130	137,2050
	70		32,8307	-0,3133	140,3367

Fonte: A autora (2024)

A energia de ativação para o processo de secagem em camada de espuma das folhas do Melão de São Caetano, nas temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C, foi de 27,9143 kJ/mol, enquanto para a secagem dos frutos a energia de ativação, para as mesmas temperaturas, foi de 35,6837 kJ/mol. Para as duas matérias primas a energia de ativação se encontrou na faixa estabelecida para materiais agrícolas, segundo Zogzas *et al.* (1996), que é de 12,7 a 110 kJ/mol.

Valores similares foram encontrados para a energia de ativação do processo de secagem de outros materiais agrícolas, como a secagem em camada de espuma da beterraba, que apresentou a energia de 23,538 kJ/mol (Bahriye *et al.*, 2023), na secagem em camada de espuma da polpa de pinha que cujo valor da energia de ativação foi de 29,99 kJ/mol (Khodifad; Kumar, 2020).

A energia de ativação representa o mínimo de energia necessário para iniciar a migração das moléculas de água do interior do material durante o processo de secagem. Quanto menor o valor da energia de ativação maior é a facilidade de remoção da água, o que indica que quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade da água no interior do material (Mabasso *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2019a; Silva *et al.*, 2017; Deng *et al.*, 2017; Alves; Rodovalho, 2016). De acordo com os resultados obtidos, a difusividade da água no processo de secagem em camada de espuma das folhas do Melão de São Caetano ocorre mais facilmente do que no processo de secagem em camada de espuma dos frutos do Melão de São Caetano.

Segundo Mabasso *et al.*, (2024), o valor da energia de ativação depende da estrutura do material, da sua composição química e da forma como a água se liga, portanto, esse valor varia de um material para outro.

A variação da entalpia ( $\Delta H$ ) está relacionada com a quantidade de energia necessária para a remoção da água ligada à matéria durante o processo de secagem (Souza *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2019a; Santos *et al.*, 2019b; Guimarães *et al.*, 2018). Os valores encontrados do  $\Delta H$  para a secagem em camada de espuma das folhas do Melão de São Caetano variaram de 25,0613 kJ/mol a 25,2276 kJ/mol, enquanto para a secagem dos frutos, nas mesmas temperaturas, houve uma variação de 32,8307 kJ/mol a 32,9970 kJ/mol. Os maiores valores do  $\Delta H$  indicam que a secagem em camada de espuma dos frutos do Melão de São Caetano demanda uma maior quantidade de energia do que a secagem das suas folhas, dentro das mesmas condições. Para a secagem das duas matérias primas observa-se um processo endotérmico, evidenciado pelo sinal positivo do  $\Delta H$ , indicando que houve absorção de calor durante a operação (Souza *et al.*, 2021; Shafaei; Masoumi; Roshan, 2016).

Percebeu-se que, para as duas matérias primas, houve uma redução na demanda energética ( $\Delta H$ ) com o acréscimo da temperatura. Comportamento coerente com estudos anteriores citados na literatura como na secagem das folhas de arruda (Mabasso *et al.*, 2024), na secagem do tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) (Souza *et al.*, 2021), na secagem das sementes de tamarindo (*Tamarindus indica* L.) (Ferreira Júnior *et al.*, 2021), na secagem de fatias de acuri (Santos *et al.*, 2019a) e na secagem da polpa de patauá (*Oenocarpus bataua* Mart) (Santos *et al.*, 2019b). Tal comportamento é explicado pelo aumento da pressão parcial do vapor de água da amostra devido a elevação da temperatura do ar de secagem, ocasionando em uma difusão mais rápida da água do interior para a superfície do material, portanto, demandando uma menor quantidade de energia necessária para a remoção da água por difusão (Souza *et al.*, 2021).

A entropia ( $\Delta S$ ) está relacionada com o grau de excitação e ao arranjo espacial das moléculas de água no material (Santos *et al.*, 2019b; Silva *et al.*, 2016). Os valores de  $\Delta S$  para a secagem em camada de espuma das folhas do Melão de São Caetano variaram de -0,3356 kJ/mol.K a -0,3351 kJ/mol.K e para a secagem de seus frutos, nas mesmas condições, essa variação foi de -0,3133 kJ/mol.K a -0,3128 kJ/mol.K. Para as duas matérias primas foi possível notar uma redução no valor do  $\Delta S$  com o aumento da temperatura. Estudos anteriores apresentaram resultados similares como na secagem da polpa de bacaba, onde houve uma variação do  $\Delta S$  de -0,3044 kJ/mol.K a -0,3039 kJ/mol.K (Morais *et al.*, 2019), na secagem das fatias de acuri onde o  $\Delta S$  variou de -374,72 e -374,01 J/mol.K (Santos *et al.*, 2019a) e na secagem da polpa de patauá que apresentou

valores de  $\Delta S$  entre -0,3130 a -0,3135 kJ/mol.K, para uma camada de 0,3 cm de espessura, e entre -0,3246 e -0,3251 kJ/mol.K para as amostras com 0,6 cm de espessura (Santos *et al.*, 2019b). Em todos esses estudos também foi observado uma redução no valor de  $\Delta S$  com o acréscimo na temperatura de secagem, que é explicado pela redução da umidade ocasionada pelo aumento da velocidade de difusão da água com o aumento da temperatura, resultando na redução dos sítios disponíveis e na restrição do movimento das moléculas (Souza *et al.*, 2021; Cagnin *et al.*, 2017).

A secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano apresentaram valores positivos para a energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ), indicando um processo não espontâneo, ou seja, se faz necessário fornecer energia para que a secagem ocorra (Ferreira Júnior *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2019b; Guimarães *et al.*, 2018). Os valores de  $\Delta G$  para a secagem das folhas variou de 133,5236 kJ/mol e 140,2311 kJ/mol e para a secagem dos frutos variou de 134,0758 kJ/mol a 140,3367 kJ/mol. Foi possível observar que houve um acréscimo nos valores de  $\Delta G$  com o aumento da temperatura, para a secagem das folhas e dos frutos. Comportamento semelhante ao da secagem do quiabo, onde os valores de  $\Delta G$  ficou entre 142,09 kJ/mol e 153,12 kJ/mol (Santos *et al.*, 2021), da secagem do feijão azuki, em que o  $\Delta G$  variou de 131,39 (40 °C) a 144,92 kJ/mol (80 °C) (Almeida *et al.*, 2020) e na secagem das fatias de acuri, onde os valores de  $\Delta G$  variaram de 139.489,30 a 150.720,39 J/mol (Santos *et al.*, 2019a).

A energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) é uma função termodinâmica responsável por quantificar o valor máximo de energia liberada em um processo, sendo, em condições de temperatura e pressão constantes, um indicativo do trabalho útil realizado (Santos *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2021; Araújo *et al.*, 2017). Portanto, quanto maior a temperatura maior o trabalho útil realizado na secagem em camada de espuma das folhas e frutos do Melão de São Caetano.

## 4.5 CARACTERÍSTICAS DO PÓ OBTIDO

### 4.5.1 Teor de água

O teor de água dos pós das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma foi analisado seguindo o planejamento experimental e os valores obtidos podem ser observados na Tabela 20.

**Tabela 20** – Resultados da análise de teor de água do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano

Exp.	Cesp (%)	tag (min)	T (°C)	Folhas	Frutos
				Teor de água (%)	Teor de água (%)
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	9,2265 <sup>a</sup> ± 0,2097	10,4169 <sup>a</sup> ± 0,3050
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	9,0970 <sup>ab</sup> ± 0,0998	8,9245 <sup>b</sup> ± 0,317
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	9,1521 <sup>a</sup> ± 0,0723	8,8741 <sup>b</sup> ± 0,0706
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	9,0146 <sup>ab</sup> ± 0,0542	8,7475 <sup>b</sup> ± 0,1790
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	8,1474 <sup>cd</sup> ± 0,0909	8,3616 <sup>bcd</sup> ± 0,1335
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	7,9433 <sup>d</sup> ± 0,0996	7,9662 <sup>cde</sup> ± 0,0392
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	8,0354 <sup>cd</sup> ± 0,0316	7,9547 <sup>de</sup> ± 0,0732
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	7,5126 <sup>d</sup> ± 0,3998	7,7882 <sup>e</sup> ± 0,1019
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	8,5669 <sup>bc</sup> ± 0,4063	8,5964 <sup>b</sup> ± 0,2691
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	8,5381 <sup>bc</sup> ± 0,0839	8,5536 <sup>bc</sup> ± 0,3267
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	8,5299 <sup>bc</sup> ± 0,2642	8,5381 <sup>bc</sup> ± 0,0839

C.esp – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura de secagem

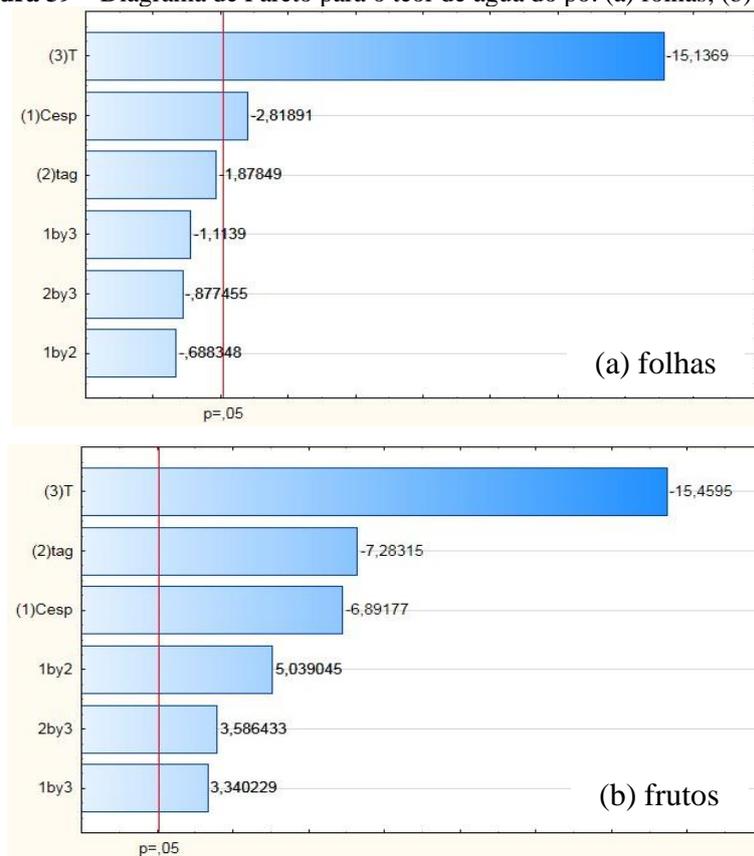
Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

Os experimentos foram realizados em triplicata e os valores expostos são as médias e seu desvio padrão. De acordo com o teste de Tukey houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os valores obtidos.

Os valores obtidos para o teor de água do pó das folhas do Melão de São Caetano variaram de  $7,5126 \pm 0,3998\%$  (experimento 8) a  $9,2265 \pm 0,2097\%$  (experimento 1) e do pó de seus frutos ficaram entre  $7,7882 \pm 0,1019\%$  (experimento 8) e  $10,4169 \pm 0,3050\%$  (experimento 1). Teor de água menor do que 10% proporciona segurança para o armazenamento do material (Paiva *et al.*, 2023). De maneira geral, os pós das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano estão aptos para um armazenamento seguro, visto que apresentaram valores do teor de água dentro da faixa ideal.

Os efeitos das variáveis independentes sobre o teor de água dos pós das folhas e frutos do Melão de São Caetano estão representados pelo diagrama de Pareto da Figura 39.

**Figura 39** – Diagrama de Pareto para o teor de água do pó: (a) folhas; (b) frutos

Fonte: A autora (2024)

A temperatura de secagem (T) foi a variável que mais afetou, significativamente ( $p < 0,05$ ), o teor de água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, apresentando efeito de sinal negativo, ou seja, o aumento na temperatura de secagem ocasiona uma redução no teor de água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano. Tal comportamento é explicado pelo fato de que a elevação da temperatura acelera o processo de evaporação da água presente no material e foi observado por outros estudos de secagem em camada de espuma, como na secagem do tomate, onde o pó seco na temperatura de 60 °C apresentou teor de água de 6,48% e o pó obtido a 80 °C apresentou teor de água de 5,36% (Purbassari; Ardhyansyah, 2024). E na secagem da beterraba vermelha o teor de água passou de  $6,308 \pm 0,097\%$  para  $6,092 \pm 0,046\%$  com o aumento da temperatura de 50 °C para 70 °C (Bahriye *et al.*, 2023).

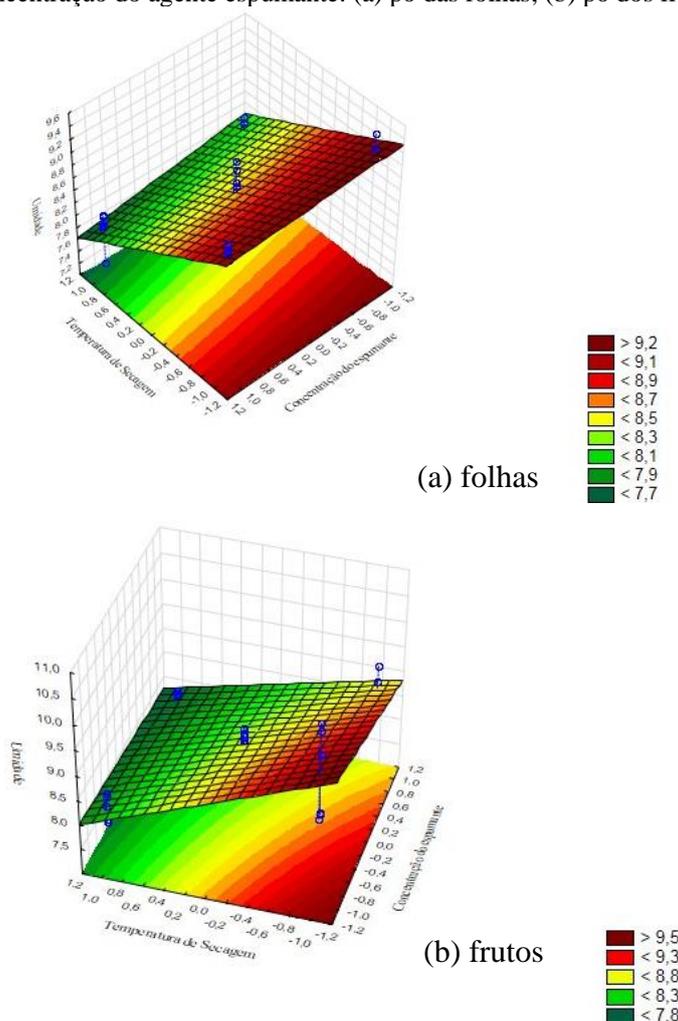
A concentração do agente espumante também afetou, significativamente ( $p < 0,05$ ), de forma inversamente proporcional, o teor de água pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano. Comportamento similar foi observado por Tan e Sulaiman (2019) na secagem do *Hibiscus sabdariffa* L., onde o aumento da concentração do agente

espumante de 5 para 20% resultou em uma diminuição no teor de água do pó de  $6,71 \pm 0,11\%$  para  $5,79 \pm 0,06\%$ . Os autores atribuíram esse comportamento ao efeito do agente espumante na formação da espuma, onde o aumento na sua quantidade proporciona uma maior incorporação de ar na solução, tornando a espuma menos densa, o que facilita a difusão e, assim, aumenta a eficiência da secagem.

A maior incorporação de ar na formação da espuma também justifica o efeito negativo do tempo de agitação (tag) sobre o teor de água do pó, que foi estatisticamente significativo ( $p < 0,05$ ) para o pó dos frutos do Melão de São Caetano.

O efeito da temperatura de secagem e da concentração do agente espumante sobre o teor de água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano também pode ser observado nas superfícies de respostas da Figura 40, onde é possível perceber que o efeito da temperatura de secagem é significativamente superior ao efeito do agente espumante.

**Figura 40** – Superfície de resposta para o teor de água do pó em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante: (a) pó das folhas; (b) pó dos frutos



Fonte: A autora (2024)

#### 4.5.2 Atividade de água (aw)

A atividade de água (aw) dos pós das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma, foi analisada seguindo o planejamento experimental, realizando duas réplicas para cada experimento e os valores das médias obtidas, assim como o desvio padrão, podem ser observados na Tabela 21. De acordo com o teste de Tukey houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os valores obtidos.

A atividade de água (aw) dos pós das folhas do Melão de São Caetano variou de  $0,252 \pm 0,008$  (experimento 6) à  $0,396 \pm 0,002$  (experimento 2) e os pós dos frutos apresentaram valores da atividade de água entre  $0,248 \pm 0,013$  e  $0,308 \pm 0,006$ .

A atividade de água é um importante parâmetro para determinar a estabilidade química e física do material, assim como a sua segurança microbiológica. Um valor de atividade de água menor do que 0,6 proporciona segurança para o armazenamento do material (Paiva *et al.*, 2023). De acordo com os resultados, todos os pós, das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, apresentaram valor de atividade de água adequado para um armazenamento seguro.

**Tabela 21** – Resultados da análise de atividade de água (aw) do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano

Exp.	Cesp (%)	tag (min)	T (°C)	Folhas	Frutos
				AW	AW
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	$0,348^{ab} \pm 0,018$	$0,308^a \pm 0,006$
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	$0,396^a \pm 0,002$	$0,304^a \pm 0,005$
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	$0,334^{ab} \pm 0,013$	$0,307^a \pm 0,004$
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	$0,316^{bc} \pm 0,016$	$0,306^a \pm 0,004$
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	$0,290^{bc} \pm 0,018$	$0,252^{bc} \pm 0,006$
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	$0,252^c \pm 0,008$	$0,257^{bc} \pm 0,005$
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	$0,278^{bc} \pm 0,011$	$0,262^{bc} \pm 0,003$
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	$0,286^{bc} \pm 0,041$	$0,248^{bc} \pm 0,013$
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	$0,338^{ab} \pm 0,005$	$0,273^{bc} \pm 0,004$
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	$0,254^c \pm 0,013$	$0,277^b \pm 0,005$
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	$0,299^{bc} \pm 0,030$	$0,275^b \pm 0,011$

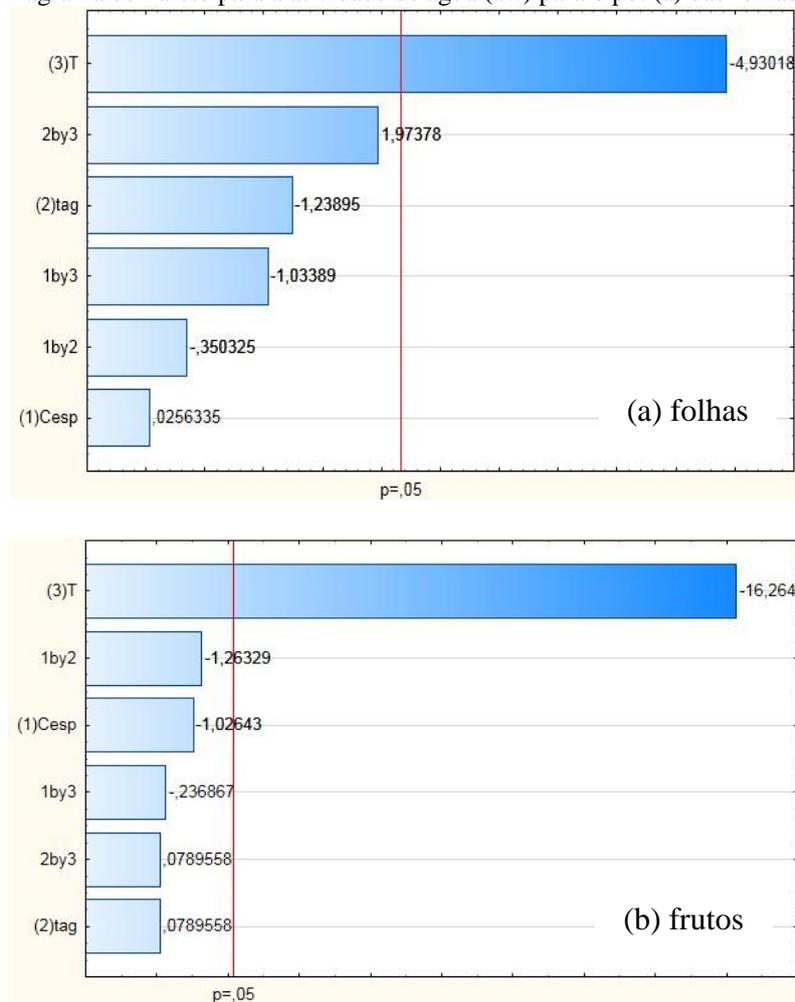
C – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura de secagem

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

O efeito das variáveis independentes sobre a atividade de água ( $a_w$ ) do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano pode ser observado nos diagramas de Pareto da Figura 41.

**Figura 41** – Diagrama de Pareto para a atividade de água ( $a_w$ ) para o pó: (a) das folhas; (b) dos frutos



Fonte: A autora (2024)

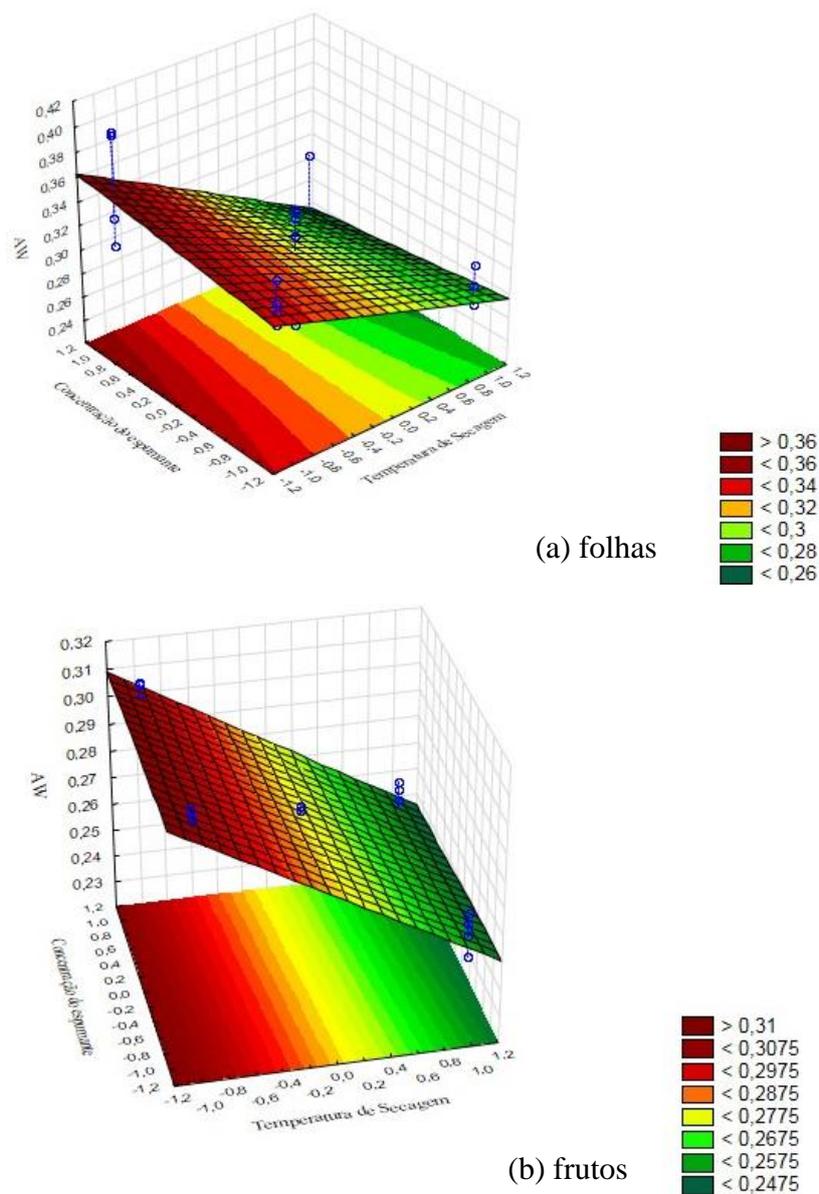
A temperatura de secagem (T) foi a única variável que apresentou influência, estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ), dentro do intervalo de significância estudado, para a atividade de água do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano. O efeito dessa variável apresentou sinal negativo, indicando que o aumento da temperatura de secagem reduz a atividade de água dos pós.

Outros estudos encontrados na literatura apresentam a redução da atividade de água com o aumento da temperatura de secagem, como na secagem em camada de espuma do suco de laranja (Tabari; Hamzeh, 2024), na secagem em camada de espuma de frutas vermelhas tropicais (Paiva *et al.*, 2023) e na secagem em camada de espuma da polpa da

banana (Watharkar *et al.*, 2021). Assim como para a umidade do pó, o aumento da evaporação da água do material com o acréscimo na temperatura de secagem também justifica o efeito dessa variável sobre a atividade de água do pó.

O efeito da temperatura de secagem sobre a atividade de água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano também pode ser observado nas superfícies de respostas da Figura 42.

**Figura 42** – Superfície de resposta para a atividade de água do pó em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante: (a) das folhas; (b) dos frutos



Fonte: A autora (2024)

### 4.5.3 Solubilidade em água

Na Tabela 22 constam os resultados obtidos da análise de solubilidade em água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano. A análise foi realizada em triplicata para todos os experimentos do planejamento experimental. De acordo com o teste de Tukey houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os resultados obtidos.

**Tabela 22** – Resultados obtidos da análise de solubilidade em água do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano

Exp.	Cesp (%)	tag (min)	T (°C)	Folhas	Frutos
				Solubilidade (%)	Solubilidade (%)
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	25,20 <sup>abc</sup> ± 1,48	50,50 <sup>abc</sup> ± 2,92
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	22,91 <sup>cd</sup> ± 0,47	48,63 <sup>abcd</sup> ± 1,72
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	26,53 <sup>a</sup> ± 0,30	51,63 <sup>ab</sup> ± 0,73
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	23,67 <sup>bcd</sup> ± 1,18	43,69 <sup>de</sup> ± 0,74
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	22,95 <sup>cd</sup> ± 0,32	46,85 <sup>bcd</sup> ± 1,64
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	26,12 <sup>ab</sup> ± 0,45	42,32 <sup>e</sup> ± 0,52
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	25,65 <sup>ab</sup> ± 1,27	53,06 <sup>a</sup> ± 0,38
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	21,23 <sup>d</sup> ± 0,63	49,61 <sup>abc</sup> ± 0,97
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	25,79 <sup>ab</sup> ± 0,62	48,58 <sup>abcd</sup> ± 0,95
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	25,88 <sup>ab</sup> ± 1,05	50,35 <sup>abc</sup> ± 2,00
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	25,05 <sup>abc</sup> ± 0,53	45,81 <sup>cde</sup> ± 1,02

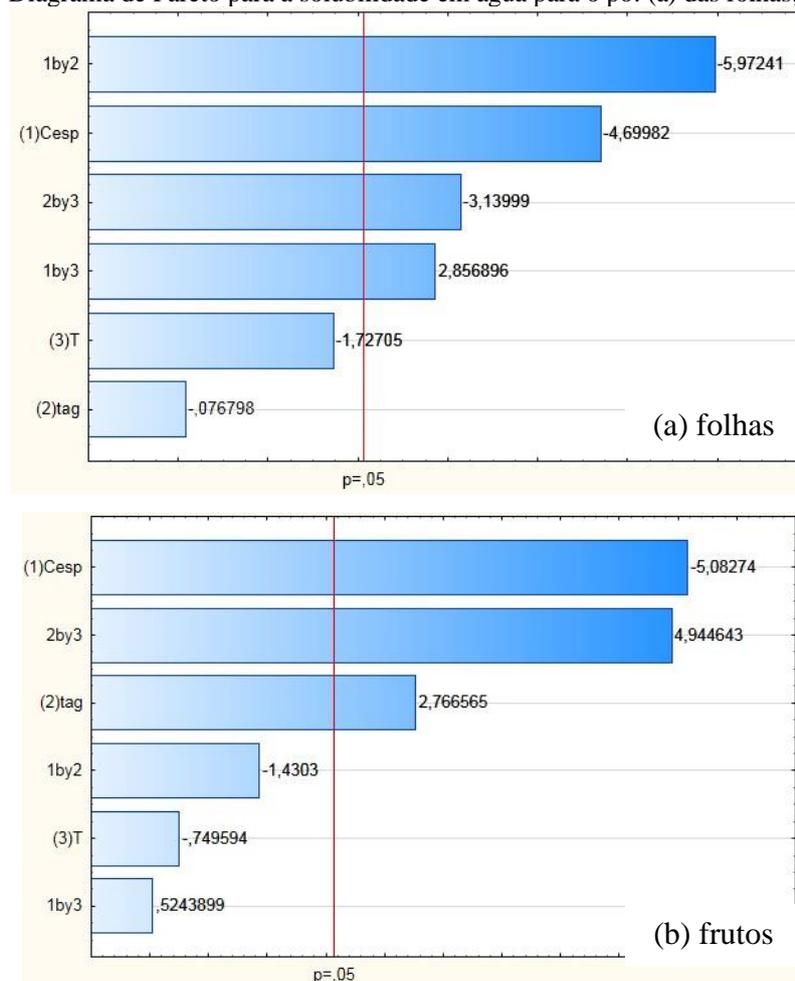
C – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura de secagem

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

O pó das folhas do Melão de São Caetano apresentou solubilidade em água de 21,23 ± 0,63% (experimento 8) a 26,53 ± 0,30% (experimento 3), enquanto no pó dos frutos o valor da solubilidade em água variou de 42,32 ± 0,52% (experimento 6) a 53,06 ± 0,38% (experimento 7). Em todas as condições estudadas o pó dos frutos do Melão de São Caetano apresentou maior solubilidade em água do que o pó de suas folhas, indicando uma maior quantidade de componentes hidrofílicos nos frutos do Melão de São Caetano.

Os efeitos das variáveis independentes sobre a solubilidade em água dos pós das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano podem ser observados nos diagramas de Pareto da Figura 43.

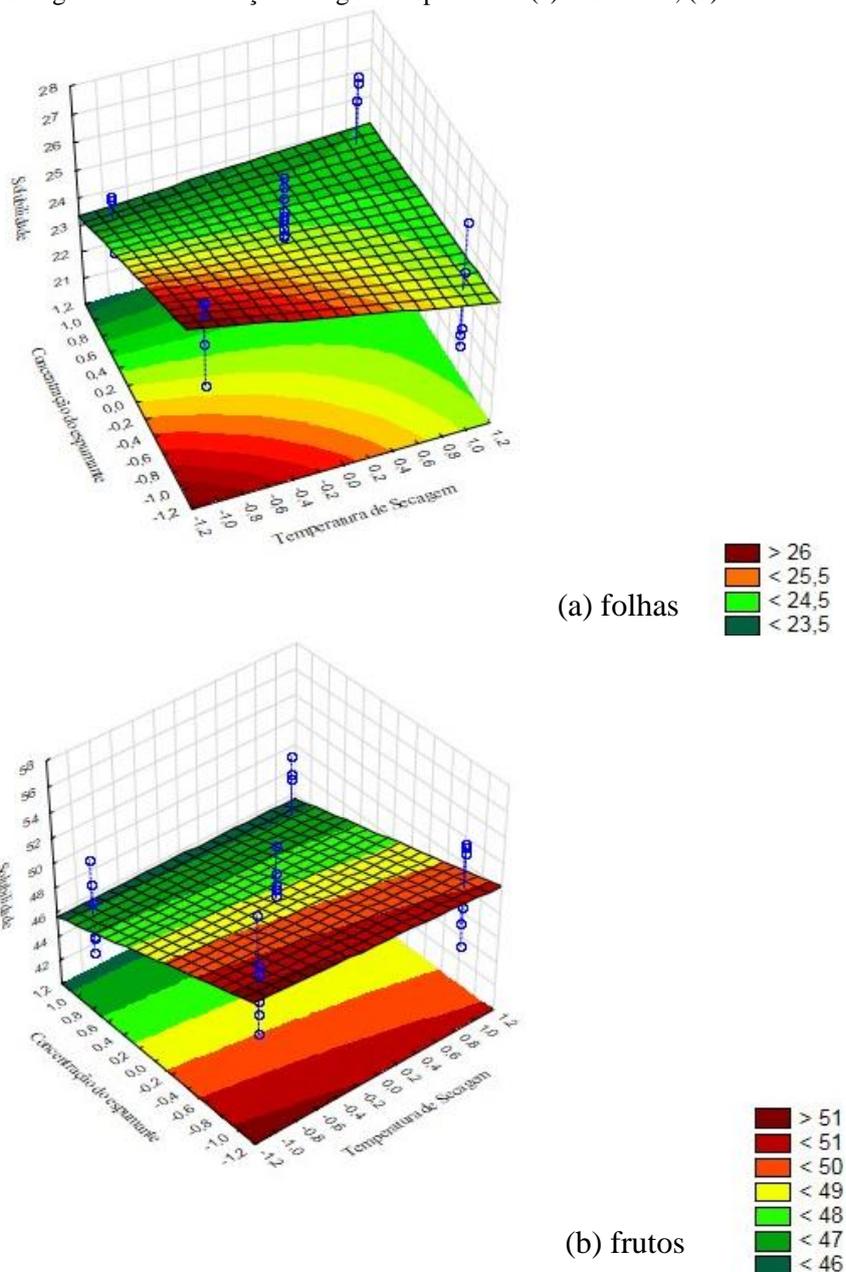
**Figura 43** – Diagrama de Pareto para a solubilidade em água para o pó: (a) das folhas; (b) dos frutos

Fonte: A autora (2024)

A concentração do agente espumante foi a variável, estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ), de maior influência sobre a solubilidade em água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, sendo sua influência de sinal negativo, indicando que o aumento na concentração do agente espumante ocasiona uma redução na solubilidade do pó em água. Na secagem em camada de espuma das folhas da gravioleira o Portogel® também foi utilizado como agente espumante e também foi observado uma redução na solubilidade do pó em água com o aumento na concentração do agente espumante (Oliveira *et al.*, 2020), tal comportamento pode ser explicado devido a componentes insolúveis presentes no Portogel®, com isto, o aumento na quantidade do agente espumante ocasiona um aumento na quantidade de componentes insolúveis em água.

O efeito da concentração do agente espumante sobre a solubilidade em água do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano também pode ser observado nas superfícies de respostas da Figura 44.

**Figura 44** – Superfície de resposta para a solubilidade em água do pó em função da temperatura de secagem e a concentração do agente espumante: (a) das folhas; (b) dos frutos



Fonte: A autora (2024)

#### 4.5.4 Compostos fenólicos e capacidade antioxidante

Com a finalidade de validar a técnica de secagem em camada de espuma para as folhas e os frutos do Melão de São Caetano, foram realizadas análises do teor de compostos fenólicos e da capacidade antioxidantes, para o radical DPPH e ABTS, dos pós das duas matérias primas obtidos por liofilização e os resultados obtidos estão expostos na Tabela 23.

**Tabela 23** – Resultados obtidos para as análises de teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidantes do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano obtidos por liofilização

<b>Análise</b>	<b>Pó liofilizado das folhas</b>	<b>Pó liofilizado dos frutos</b>
Fenólicos (mg EAG/100g extrato)	1337,99 ± 21,37	947,55 ± 7,77
DPPH (µmol TE/g extrato)	35,40 ± 1,00	33,40 ± 1,00
ABTS (µmol TE/g extrato)	27,30 ± 1,25	17,30 ± 0,25

Fonte: A autora (2024)

A análise do teor de compostos fenólicos do pó das folhas e frutos do Melão de São Caetano, obtidos pela secagem em camada de espuma, foi realizada em triplicata, para todas as condições do planejamento experimental e os resultados obtidos foram expressos em termos de Equivalência ao Ácido Gálico por 100 grama de extrato da amostra (mg EAG/100g extrato), que podem ser observados na Tabela 24. De acordo com o teste de Tukey, houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os resultados obtidos.

**Tabela 24** – Resultados obtidos da análise do teor de compostos fenólicos dos pós das folhas e frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma

<b>Exp.</b>	<b>Cesp (%)</b>	<b>tag (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Pó das folhas</b>	<b>Pó dos frutos</b>
				<b>Fenólicos (mg EAG/100g extrato)</b>	<b>Fenólicos (mg EAG/100g extrato)</b>
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	1235,04 <sup>c</sup> ± 3,88	1248,64 <sup>de</sup> ± 9,71
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	1003,88 <sup>d</sup> ± 9,71	1289,43 <sup>de</sup> ± 3,88
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	1005,83 <sup>d</sup> ± 11,65	1308,86 <sup>d</sup> ± 11,65
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	1203,96 <sup>c</sup> ± 23,31	1427,32 <sup>c</sup> ± 1,94
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	1336,05 <sup>b</sup> ± 15,54	1691,53 <sup>a</sup> ± 5,83
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	1172,88 <sup>c</sup> ± 0,00	1508,94 <sup>b</sup> ± 17,48
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	1398,21 <sup>b</sup> ± 7,77	1485,63 <sup>bc</sup> ± 9,71
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	1493,39 <sup>a</sup> ± 13,60	1470,09 <sup>bc</sup> ± 5,83
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	1170,94 <sup>c</sup> ± 1,94	1233,10 <sup>e</sup> ± 25,25
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	1182,59 <sup>c</sup> ± 9,71	1235,04 <sup>e</sup> ± 3,88
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	1180,65 <sup>c</sup> ± 15,54	1233,10 <sup>e</sup> ± 17,48

C – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura de secagem

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

O teor dos compostos fenólicos do pó das folhas do Melão de São Caetano variou de  $1003,88 \pm 9,71$  a  $1493,39 \pm 13,60$  mg EAG/100g extrato e o pó de seus frutos apresentou valores entre  $1233,10 \pm 17,48$  e  $1691,53 \pm 5,83$  mg EAG/100g extrato. Quando comparado aos pós obtidos por liofilização, é possível observar que os pós obtidos por secagem em camada de espuma apresentaram bons resultados, sendo eles muito superiores no caso do pó dos frutos, portanto a técnica aplicada proporcionou uma boa preservação dos compostos fenólicos das amostras.

Os resultados obtidos foram superiores a alguns estudos encontrados na literatura para outras técnicas de secagem do Melão de São Caetano, como na secagem de fatias do Melão de São Caetano utilizando uma combinação de secagem convectiva de baixa temperatura e radiação de micro-ondas, onde os autores obtiveram a maior quantidade de fenólicos totais de 459,04 mgEAG/100g, utilizando a potência do micro-ondas de 3,0 W/g e o menor valor encontrado foi de 359,46 mgEAG/100g, na potência 1,5 W/g, a menor potência utilizada no estudo e que teve o maior tempo de secagem. Portanto, os autores atribuíram o menor valor encontrado ao maior tempo de exposição do material à radiação do micro-ondas, que resultou na decomposição dos componentes ativos da amostra (Nguyen *et al.*, 2020).

Os resultados também foram superiores aos do estudo de Youn, Park e Yoon (2019) da secagem do fruto do Melão de São Caetano utilizando diferentes técnicas, onde o maior teor de fenólicos foi de 340 mg GAE/100g, encontrado no pó obtido por secagem com ar quente. Já o menor teor foi encontrado no pó seco ao sol, sendo 275 mgEAG/100g. Para o pó seco por liofilização e por infravermelho os valores encontrados foram de 283 e 313 mgEAG/100g, respectivamente.

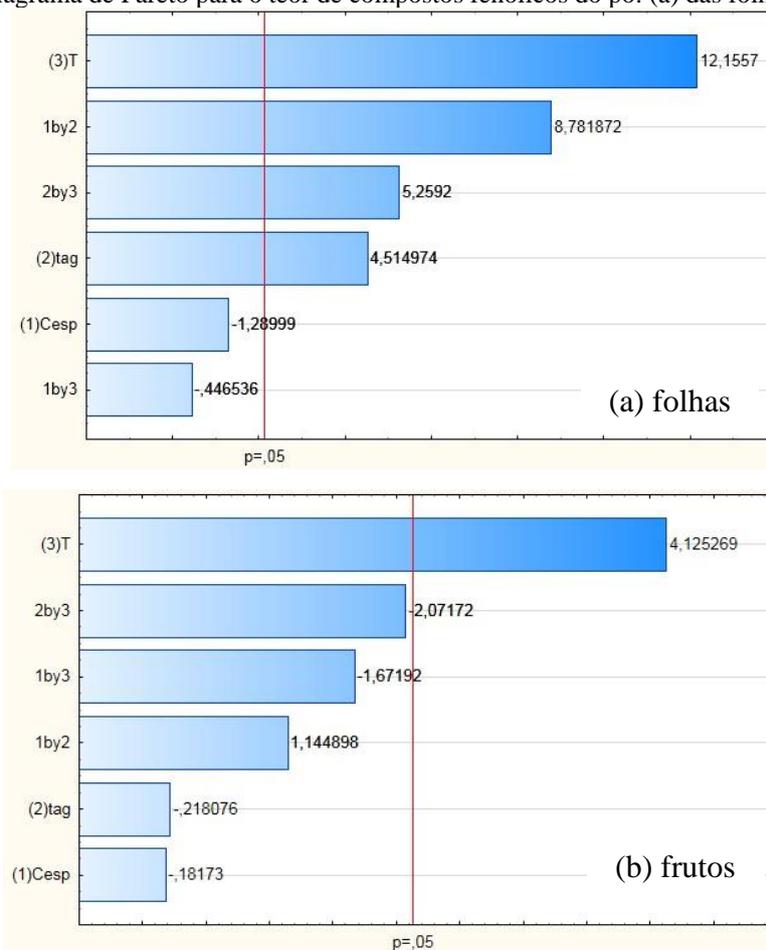
No estudo de Kim *et al.* (2023) sobre o comportamento dos compostos bioativos do fruto do Melão de São Caetano em diferentes tratamentos térmicos e em diferentes estágios de maturação, os autores relataram que os maiores valores encontrados para os componentes fenólicos foram de 1180,00, 1370,00 e 2530,00 mg EAG/100g do material, seguindo a ordem do mais imaturo ao mais maturo, respectivamente, todos na secagem em máquina seca com ar quente à 90 °C e os menores valores obtidos foram dos pós obtidos por liofilização, sendo 410, 490 e 560 mgEAG/100g do material, na ordem do mais imaturo para o mais maduro, respectivamente (Kim *et al.*, 2023).

Os valores encontrados são superiores ou se aproximam com os dados encontrados na literatura, sendo a diferença encontrada justificada pela diferença do

tratamento térmico e, possivelmente, pelo estágio de maturação dos frutos, visto que ficou evidenciado que a maturação afeta o teor de compostos fenólicos desse material.

Os efeitos das variáveis independentes sobre o teor de compostos fenólicos do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano podem ser observados através dos diagramas de Pareto da Figura 45.

**Figura 45** – Diagrama de Pareto para o teor de compostos fenólicos do pó: (a) das folhas; (b) dos frutos



Fonte: A autora (2024)

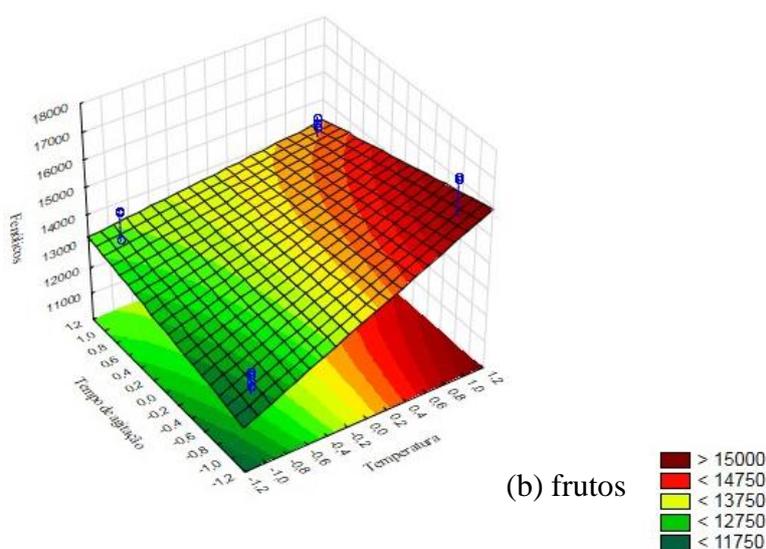
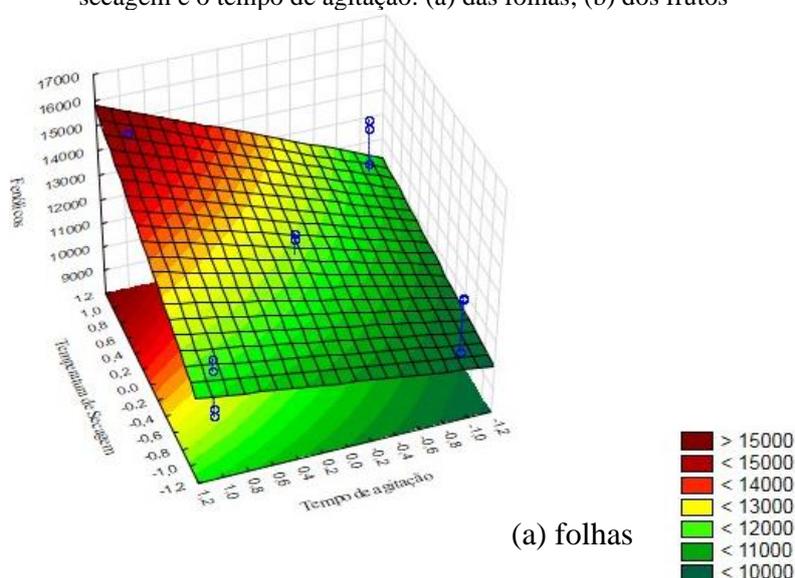
Para ambas as matérias primas a temperatura de secagem influenciou, de forma estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ), positivamente o teor de compostos fenólicos no pó. Esse comportamento pode ser atribuído à redução do tempo de secagem devido ao aumento da temperatura, permitindo uma menor exposição do material ao calor, evitando assim a degradação dos compostos fenólicos (Brar *et al.*, 2020). Tal efeito da temperatura foi observado em outros estudos de secagem em camada de espuma, como na secagem do louro cereja (Guldane; Bozkir, 2024), na secagem da polpa de cornalina (*Cornus mas*

L.) (Kaba *et al.*, 2023) e na secagem dos frutos do Melão de São Caetano (Kim *et al.*, 2023).

O tempo de agitação também apresentou influência, estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ), positiva sobre o teor de compostos fenólicos do pó das folhas do Melão de São Caetano, que pode ser atribuída à maior incorporação de ar durante a agitação, que acaba facilitando a migração da água do interior do material, reduzindo também o tempo necessário de exposição do material ao ar de secagem.

Os efeitos da temperatura de secagem e do tempo de agitação também podem ser observados na Figura 46.

**Figura 46** – Superfície de resposta para o teor de compostos fenólicos do pó em função da temperatura de secagem e o tempo de agitação: (a) das folhas; (b) dos frutos



Fonte: A autora (2024)

Na Tabela 25 estão expostos os resultados obtidos, expressos em termos de Equivalência ao Trolox por grama do extrato ( $\mu\text{mol TE/g}$  extrato), da análise da capacidade antioxidante, para os radicais DPPH e ABTS, dos pós das folhas e frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma. De acordo com o teste de Tukey, houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os resultados obtidos.

**Tabela 25** – Resultados obtidos da análise da capacidade antioxidante, para os radicais DPPH e ABTS, dos pós das folhas e frutos do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma

Exp.	Cesp (%)	tag (min)	T (°C)	Pós das folhas		Pós dos frutos	
				DPPH ( $\mu\text{mol TE / g}$ extrato)	ABTS ( $\mu\text{mol TE / g}$ extrato)	DPPH ( $\mu\text{mol TE / g}$ extrato)	ABTS ( $\mu\text{mol TE / g}$ extrato)
1	3 (-1)	4 (-1)	50 (-1)	36,40 <sup>cd</sup> $\pm$ 2,00	36,55 <sup>bc</sup> $\pm$ 0,50	9,40 <sup>b</sup> $\pm$ 1,00	22,43 <sup>e</sup> $\pm$ 3,13
2	7 (1)	4 (-1)	50 (-1)	42,90 <sup>ab</sup> $\pm$ 1,50	30,55 <sup>f</sup> $\pm$ 0,00	7,40 <sup>b</sup> $\pm$ 2,00	23,05 <sup>e</sup> $\pm$ 0,25
3	3 (-1)	8 (1)	50 (-1)	46,90 <sup>a</sup> $\pm$ 0,50	38,38 <sup>b</sup> $\pm$ 0,00	11,90 <sup>b</sup> $\pm$ 0,50	25,43 <sup>e</sup> $\pm$ 0,13
4	7 (1)	8 (1)	50 (-1)	36,90 <sup>bcd</sup> $\pm$ 0,50	32,63 <sup>ef</sup> $\pm$ 0,13	12,90 <sup>b</sup> $\pm$ 0,50	28,55 <sup>bcd</sup> $\pm$ 0,25
5	3 (-1)	4 (-1)	70 (1)	39,90 <sup>bc</sup> $\pm$ 1,50	34,63 <sup>cd</sup> $\pm$ 0,00	22,40 <sup>a</sup> $\pm$ 2,00	35,30 <sup>a</sup> $\pm$ 0,25
6	7 (1)	4 (-1)	70 (1)	35,40 <sup>cd</sup> $\pm$ 0,00	32,55 <sup>de</sup> $\pm$ 0,63	22,40 <sup>a</sup> $\pm$ 1,00	33,55 <sup>abcd</sup> $\pm$ 0,50
7	3 (-1)	8 (1)	70 (1)	32,90 <sup>d</sup> $\pm$ 1,50	32,47 <sup>e</sup> $\pm$ 0,63	7,40 <sup>b</sup> $\pm$ 1,00	34,68 <sup>ab</sup> $\pm$ 0,37
8	7 (1)	8 (1)	70 (1)	40,40 <sup>bc</sup> $\pm$ 1,00	41,80 <sup>a</sup> $\pm$ 0,63	10,40 <sup>b</sup> $\pm$ 2,00	33,80 <sup>abc</sup> $\pm$ 0,25
9	5 (0)	6 (0)	60 (0)	38,90 <sup>bcd</sup> $\pm$ 0,50	32,55 <sup>ef</sup> $\pm$ 0,50	8,90 <sup>b</sup> $\pm$ 0,50	28,30 <sup>cde</sup> $\pm$ 0,25
10	5 (0)	6 (0)	60 (0)	38,40 <sup>bcd</sup> $\pm$ 0,00	32,72 <sup>de</sup> $\pm$ 0,13	9,40 <sup>b</sup> $\pm$ 1,00	27,43 <sup>de</sup> $\pm$ 0,88
11	5 (0)	6 (0)	60 (0)	36,90 <sup>bcd</sup> $\pm$ 0,50	32,47 <sup>cd</sup> $\pm$ 0,00	7,90 <sup>b</sup> $\pm$ 0,50	26,30 <sup>e</sup> $\pm$ 1,50

C – concentração do agente espumante; tag – tempo de agitação; T – temperatura de secagem

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey

Fonte: A autora (2024)

Para o radical DPPH, a capacidade antioxidante do pó das folhas do Melão de São Caetano, obtido por secagem em camada de espuma, variou de  $32,90 \pm 1,50$  a  $46,90 \pm 0,50 \mu\text{mol TE/g}$  extrato, enquanto para o pó dos frutos essa variação foi de  $7,40 \pm 2,00$  a  $22,40 \pm 2,00 \mu\text{mol TE/g}$  extrato.

O pó das folhas obtido por secagem em camada de espuma apresentou valores satisfatórios para capacidade antioxidante do radical DPPH quando comparado com o pó obtido por liofilização, visto que, os valores obtidos ficam bem próximos ou superiores ao do pó liofilizado. Já os pós dos frutos obtidos por secagem em camada de espuma

apresentaram resultados inferiores ao do pó liofilizado, indicando que a técnica de secagem afetou a capacidade antioxidante desse material.

Os resultados obtidos foram superiores aos encontrados por Nguyen *et al.* (2020) na secagem de fatias do Melão de São Caetano utilizando uma combinação de secagem convectiva de baixa temperatura e radiação de micro-ondas, onde o maior valor encontrado para a capacidade de sequestrar o radical DPPH foi de 8,60  $\mu\text{molTE/g}$ , em 3,0 W/g de potência do micro-ondas e o menor valor foi de 5,76  $\mu\text{molTE/g}$ , na menor potência do estudo, que foi de 1,5 W/g, onde houve o maior tempo de secagem (Nguyen *et al.*, 2020). Os autores concluíram que o maior tempo de exposição à radiação do micro-ondas resulta na decomposição dos componentes antioxidantes da amostra.

Os resultados obtidos foram inferiores aos encontrados no pó das folhas da gravioleira obtido por secagem em camada de espuma, que variou de  $91,73 \pm 0,61$  a  $121,07 \pm 0,83 \mu\text{molTE/g}$  extrato (Oliveira *et al.*, 2020) e próximos aos resultados obtidos no estudo da secagem em camada es espuma da polpa de cornalina (*Cornus mas* L.), que ficou entre  $39,77 \pm 2,95$  e  $52,65 \pm 4,01 \mu\text{molTE/g}$  (Kaba *et al.*, 2023).

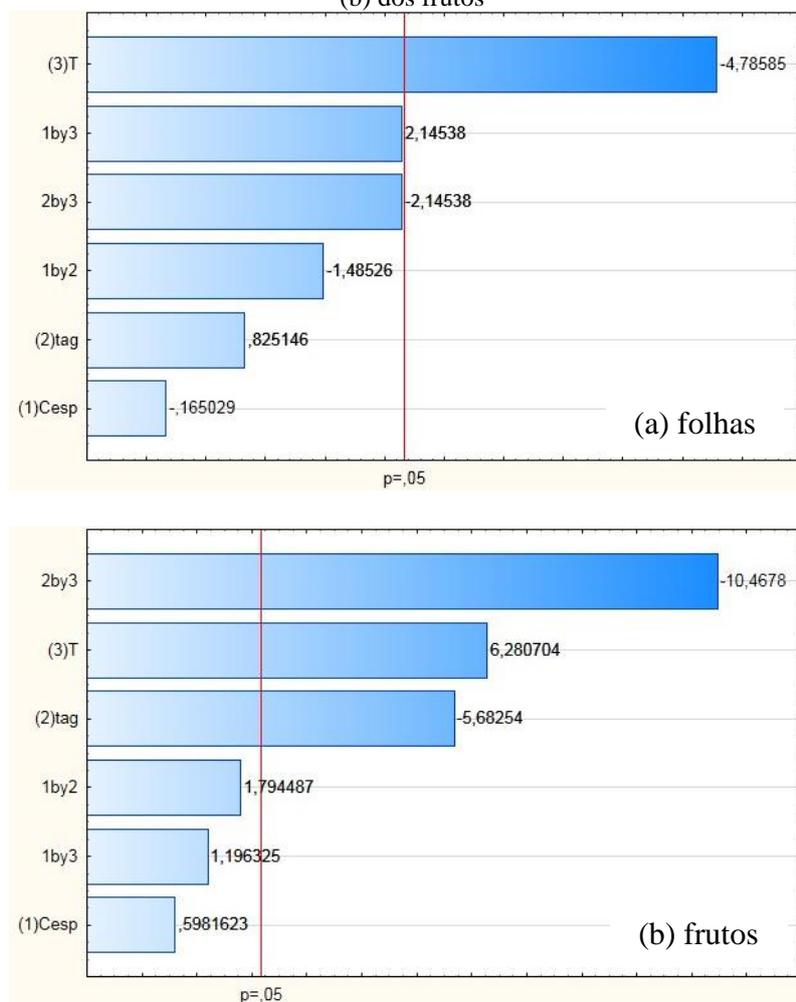
O efeito das variáveis independentes sobre a capacidade de capturar o radical DPPH do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observado nos diagramas de Pareto da Figura 47.

De acordo com os resultados, a temperatura de secagem (T) afeta, significativamente ( $p < 0,05$ ), a capacidade de capturar o radical DPPH tanto do pó das folhas quanto do pó dos frutos, porém, essa variável atua de maneira diferente nas duas matérias primas. No pó das folhas ela influencia de maneira inversamente proporcional, indicando que o aumento da temperatura pode causar degradação das substâncias capazes de capturar esse radical ou pode ocasionar variações dos polifenóis. Já para o pó dos frutos a temperatura apresentou um efeito positivo, resultado similar ao do estudo da secagem dos frutos do Melão de São Caetano em diferentes estágios de maturação, onde os autores relataram um aumento da capacidade antioxidante (DPPH) com o aumento da temperatura de secagem (Kim *et al.*, 2023). Esse comportamento também pode ser atribuído à redução do tempo de secagem devido ao aumento da temperatura, permitindo uma menor exposição do material ao calor.

Para a capacidade de capturar o radical ABTS o pó das folhas do Melão de São Caetano, obtido por secagem em camada de espuma, apresentou valores entre  $30,55 \pm 0,00$  e  $41,80 \pm 0,63 \mu\text{mol TE/g}$  extrato. E os resultados obtidos para o pó dos frutos variaram de  $22,43 \pm 3,13$  à  $35,30 \pm 0,25 \mu\text{mol TE/g}$  extrato. Os valores obtidos para ambas

as matérias primas foram satisfatórios, visto que, foram superiores aos resultados obtidos nos pós liofilizados, que foram de  $27,3 \pm 1,25$  e  $17,30 \pm 0,25$   $\mu\text{mol TE/g}$  extrato, respectivamente para as folhas e os frutos.

**Figura 47** – Diagrama de Pareto para a capacidade antioxidante do radical DPPH do pó: (a) das folhas; (b) dos frutos



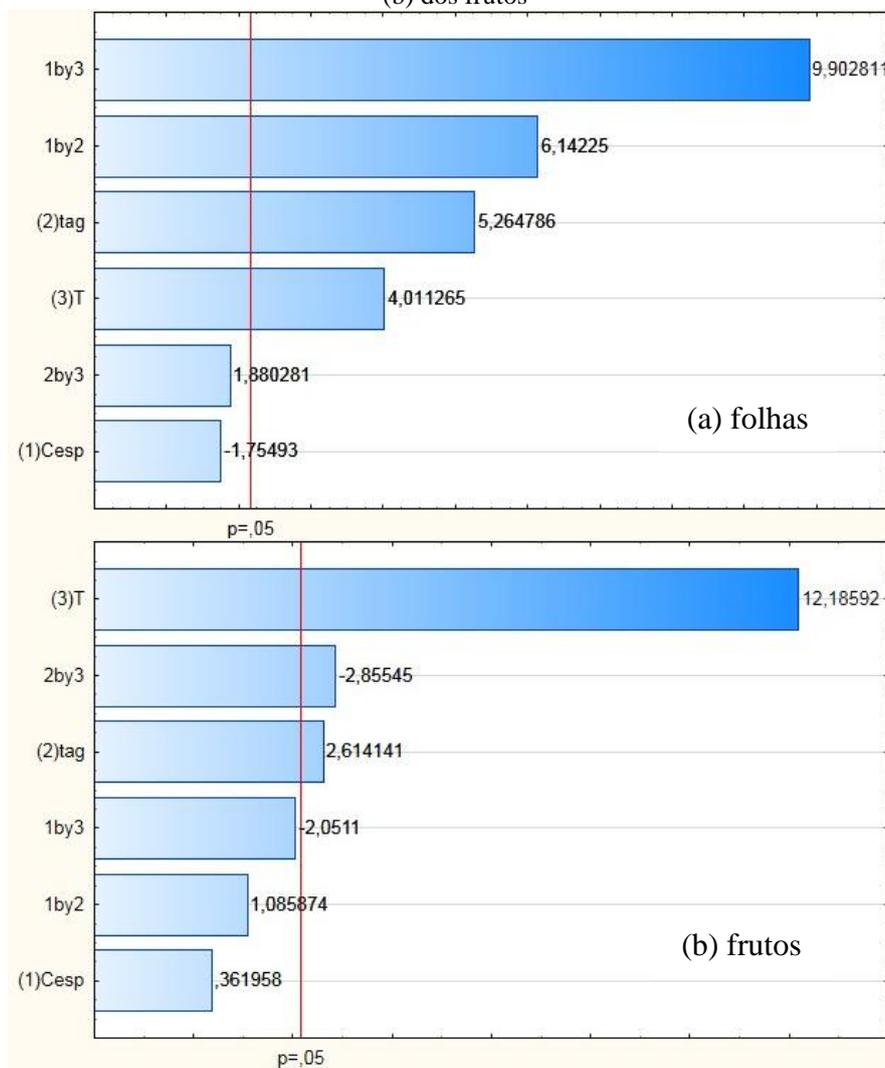
Fonte: A autora (2024)

O efeito das variáveis independentes sobre a capacidade de capturar o radical ABTS do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano pode ser observado na Figura 48.

A temperatura de secagem (T) afetou, significativamente ( $p < 0,05$ ), a capacidade antioxidante (ABTS) do pó das duas matérias primas, sendo essa influência positiva, assim como a influência do tempo de agitação. Comportamento também justificado pelo menor tempo de exposição do material ao tratamento térmico quando submetido a temperaturas mais altas e maior facilidade de evaporação da água do material quando há

uma maior incorporação de ar. Outros estudos na literatura relatam influência similar da temperatura sobre a capacidade antioxidante do radical ABTS, como na secagem dos frutos do Melão de São Caetano em diferentes estágios de maturação (Kim *et al.*, 2023).

**Figura 48** – Diagrama de Pareto para a capacidade antioxidante do radical ABTS do pó: (a) das folhas; (b) dos frutos



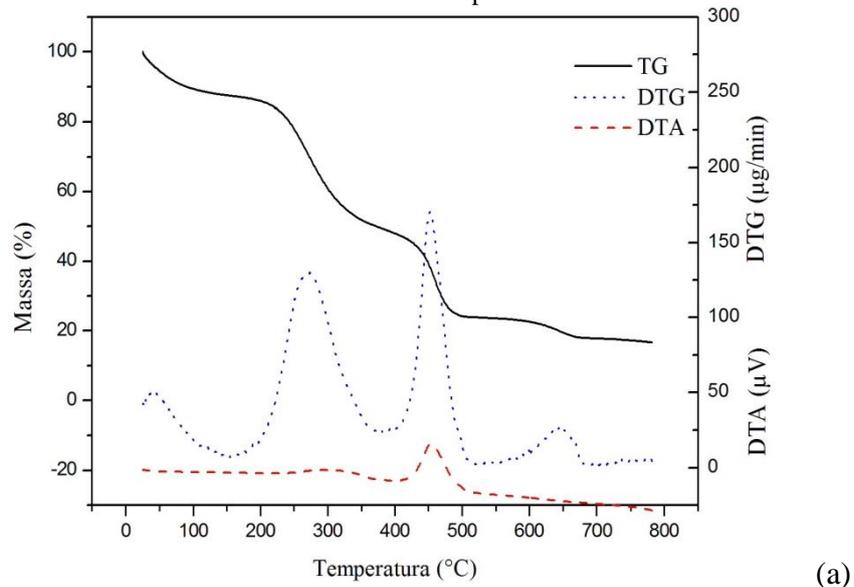
Fonte: A autora (2024)

#### 4.5.5. Análises térmicas

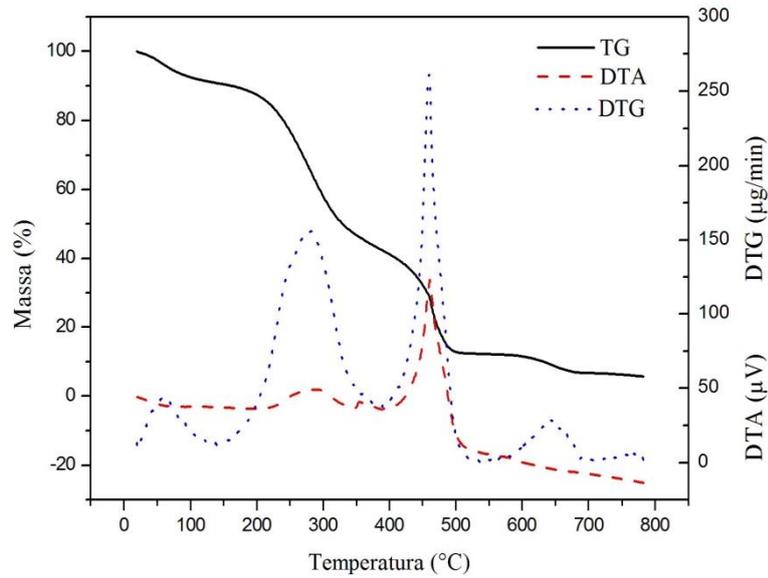
Os resultados obtidos para as análises térmicas realizadas nos pós das folhas do Melão de São Caetano, obtidos por secagem em camada de espuma e por liofilização são mostrados na Figura 49.

Percebeu-se que os pós das folhas do Melão de São Caetano apresentaram comportamentos similares das curvas de TG, com quatro picos principais de degradação.

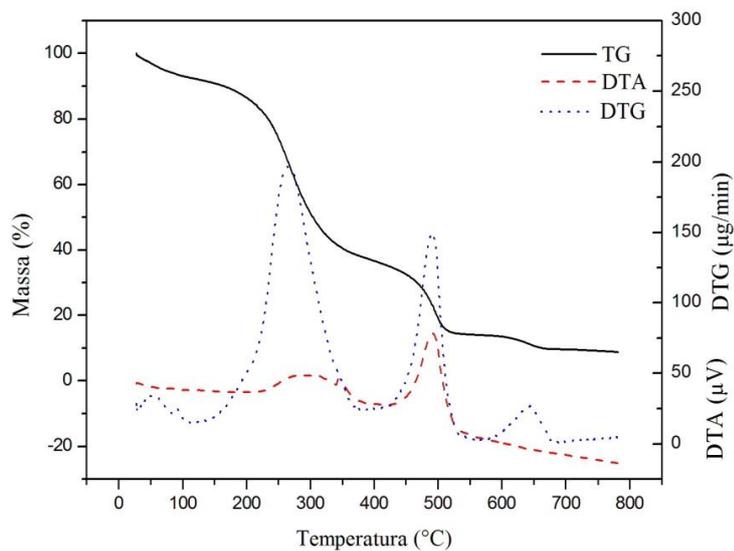
**Figura 49** - Curvas de TG, DTG e DTA para os pós das folhas do Melão de São Caetano: (a) liofilizado; (b) condições mínimas da secagem em camada de espuma; (c) condições máximas da secagem em camada de espuma



(a)



(b)



(c)

Fonte: A autora (2024)

A primeira etapa da decomposição térmica é referente a perda de produtos voláteis, principalmente à água livre presente no material (Brandão *et al.*, 2016). Para o pó obtido nas condições mínimas do planejamento experimental essa primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura de 30 a 143 °C, havendo uma perda de massa de 9,28%. Já para o pó obtido nas condições máxima do planejamento a perda de massa dessa primeira etapa foi de 7,89% e ocorreu entre 30 e 121°C. O pó obtido por liofilização teve uma perda de 12,51% de massa de 30 a 150 °C. Indicando a menor quantidade de água e voláteis no pó obtido por secagem em camada de espuma, nas condições máximas do planejamento experimental.

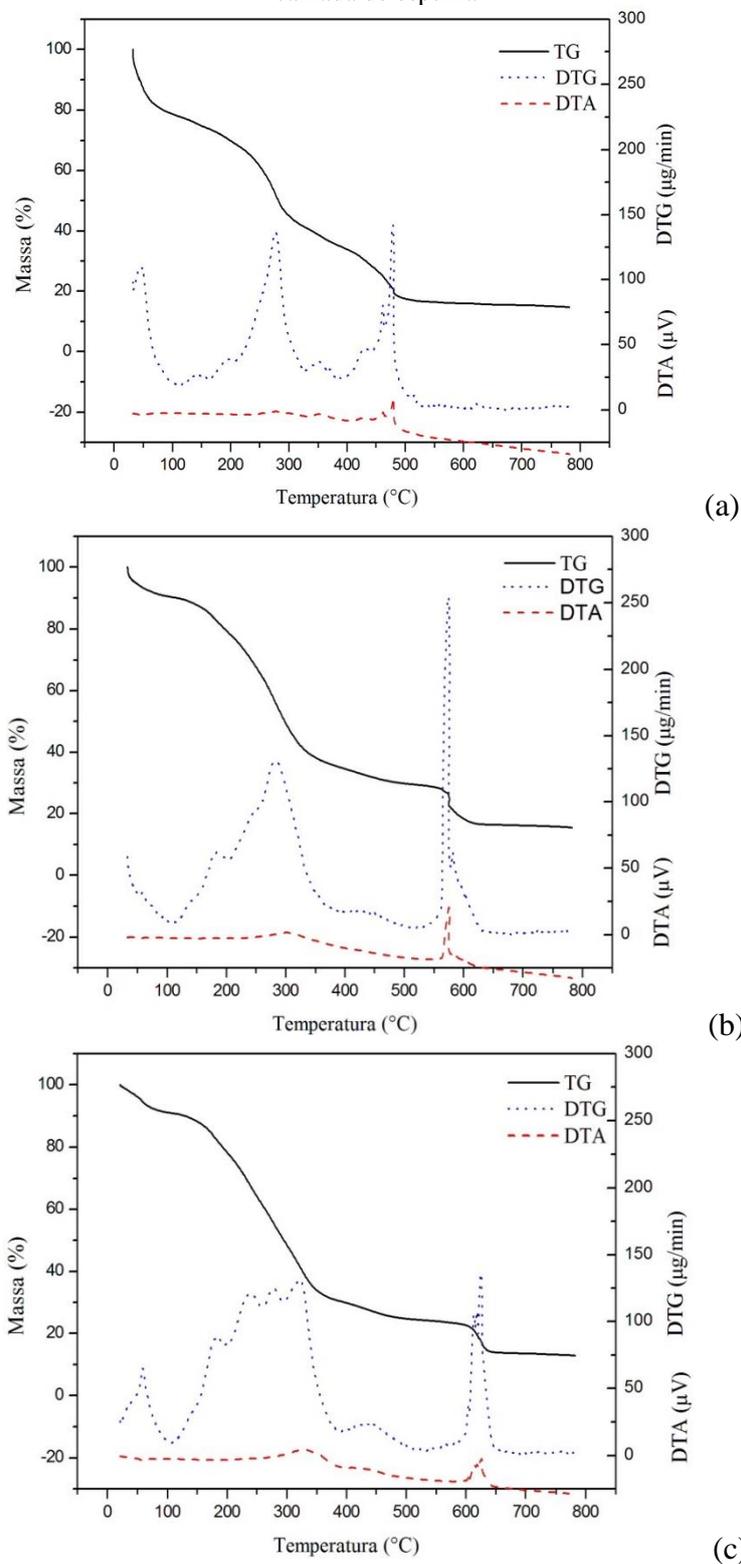
Para os três pós analisados a maior liberação de energia ocorreu na terceira etapa de degradação, evidenciado pelo maior pico da curva de DTA. É provável que esse evento esteja ligado com a decomposição térmica de carboidratos e outros compostos orgânicos presentes na amostra (Brandão *et al.*, 2016). Nessa etapa é onde ocorre a maior taxa de degradação para o pó obtido nas condições mínimas do planejamento da secagem em camada de espuma e para o pó liofilizado, sendo essa taxa de 260,67 µg/min e 170,65 µg/min, respectivamente. O pó obtido nas condições máximas do planejamento da secagem em camada de espuma apresentou maior taxa de degradação na segunda etapa, sendo de 196,76 µg/min. A presença do agente espumante pode ter contribuído para as diferenças observadas entre as amostras.

A degradação das amostras segue até a formação do resíduo mineral, no final do processo. A amostra que apresentou o menor teor de resíduo mineral foi a obtida por secagem em camada de espuma nas condições mínimas do planejamento experimental, sendo de 5,77%. O maior teor de resíduo mineral gerado foi para o pó liofilizado, sendo de 16,67% e o pó nas condições máximas da secagem em camada de espuma gerou 8,73% de resíduo mineral.

Na Figura 50 é possível observar os resultados obtidos de TG, DTG e DTA para os pós dos frutos do Melão de São Caetano obtidos por secagem em camada de espuma e por liofilização. No pó dos frutos do Melão de São Caetano obtido por camada de espuma, nas condições mínimas do planejamento experimental, a primeira etapa do processo de decomposição térmica ocorreu na faixa de temperatura de 30 a 116 °C, onde houve uma perda de massa de 10,02%. Para o pó obtido nas condições máximas do planejamento experimental na primeira etapa de decomposição houve perda de massa de 9,18% na faixa de temperatura de 30 a 107 °C. E para o pó liofilizado essa perda de massa foi de 22,24%, na faixa de temperatura de 30 a 114 °C, indicando que as condições

máximas da secagem em camada de espuma também resultaram em uma menor quantidade de água livre e voláteis para o pó dos frutos.

**Figura 50** - Curvas de TG, DTG e DTA para os pós das folhas do Melão de São Caetano: (a) liofilizado; (b) condições mínimas da secagem em camada de espuma; (c) condições máximas da secagem em camada de espuma



Fonte: A autora (2024)

No pó dos frutos do Melão de São Caetano obtido por secagem em camada de espuma, nas condições mínimas do planejamento experimental, a maior liberação de energia ocorreu na etapa com maior taxa de decomposição, que foi de 254,09  $\mu\text{g}/\text{min}$ , na temperatura de 573  $^{\circ}\text{C}$ , assim como no pó obtido por liofilização onde a maior taxa de degradação foi de 142,25  $\mu\text{g}/\text{min}$  na temperatura de 479  $^{\circ}\text{C}$ . Já o pó obtido nas condições máximas do planejamento experimental da secagem em camada de espuma apresentou maior liberação de energia na temperatura de 328  $^{\circ}\text{C}$ , onde a taxa de degradação foi de 123,48  $\mu\text{g}/\text{min}$ , enquanto a maior taxa de degradação, de 136,01  $\mu\text{g}/\text{min}$ , ocorreu na temperatura de 624  $^{\circ}\text{C}$ .

O pó dos frutos do Melão de São Caetano obtido por camada de espuma nas condições mínimas do planejamento experimental apresentou um teor de resíduo mineral de 15,51%, enquanto para o pó obtido nas condições máximas esse teor foi 12,87%. E para o pó liofilizado o resíduo mineral foi de 14,71%.

Nas análises térmicas realizadas por Brandão *et al.* (2016) do pó das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano, obtidos em estufa com circulação de ar, com diferentes granulometrias, foi encontrado um teor de resíduo mineral de 18,3 a 37% para os pós das folhas e de 10,2 a 37% para os pós dos frutos. Os autores relataram uma perda de massa no primeiro estágio de 3,3 a 7,3% para as folhas e de 3,8 a 5,3% para os pós dos frutos. Os autores relataram grande interferência do tamanho de partícula sobre o perfil de degradação térmica das amostras, onde as partículas menores apresentaram uma menor perda de massa e, conseqüentemente, um maior teor de resíduo mineral, que foi justificado, pelos autores, pela diferença de composição química em cada tamanho de partícula.

As diferentes condições e técnicas de secagem podem afetar o tamanho da partícula do pó obtido, justificando as diferenças encontradas entre as amostras analisadas, além da adição do agente espumante, que modifica a composição química do material, influenciando no perfil de degradação térmica das amostras.

## 5. CONCLUSÃO

As espumas das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano apresentaram características que favorecem o processo de secagem, como o alto índice de estabilidade, indicando que as essas espumas suportam o processo de secagem sem colapsar, garantindo a eficiência da operação e a qualidade dos produtos obtidos.

O processo de secagem em camada de espuma das folhas e dos frutos do Melão de São Caetano foi melhor representado pelos modelos de Page e Page modificado, onde foram apresentados os melhores ajustes aos dados experimentais. O processo foi afetado significativamente pela temperatura, onde o aumento dessa variável resultou no aumento da taxa de secagem, ocasionando uma redução no tempo necessário para atingir o equilíbrio (tempo total de secagem), indicando que a escolha da temperatura é fundamental para o processo, visto que, ela apresenta influência majoritária sobre o mesmo.

Os coeficientes de difusão efetivos (Def) da secagem em camada espuma, tanto das folhas quanto dos frutos, apresentaram variação na ordem de  $10^{-10}$  à  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, ficando dentro da faixa indicada para produtos agrícolas. O aumento na temperatura de secagem favoreceu difusividade, que foi representado pelo aumento do Def com a elevação da temperatura, evidenciando a importância da variável.

A secagem em camada de espuma das duas matérias primas foi caracterizada como sendo um processo endotérmico e não espontâneo, evidenciado pelo sinal positivo da entalpia ( $\Delta H$ ) e da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ). Também foi revelado que a secagem em camada de espuma das folhas necessita de uma menor quantidade de energia para acontecer, quando comparado com a secagem dos frutos, evidenciado pelos menores valores da energia de ativação ( $E_a$ ) e da entalpia ( $\Delta H$ ).

Os pós obtidos se mostraram aptos para um armazenamento seguro, visto que apresentaram valores de teor de água e atividade de água dentro da faixa considerada ideal para garantir a sua estabilidade química e física, assim como sua segurança microbiológica.

A técnica de secagem em camada de espuma, utilizada no processo, se mostrou capaz de preservar os compostos bioquímicos dos materiais estudados, que foi evidenciado pelos resultados satisfatórios do teor de compostos fenólicos e da capacidade

antioxidante, em comparativo com os resultados obtidos dos pós liofilizados e com os dados da literatura.

De maneira geral, a técnica de secagem em camada de espuma se mostrou viável para a secagem das matérias primas, onde a temperatura de secagem foi a variável que afetou majoritariamente o processo de secagem e as características dos produtos obtidos. Sendo a temperatura de 70 °C a mais indicada para ser utilizada, visando uma maior eficiência no processo de remoção da água do material e uma maior economia energética na operação. Levando em consideração que essa temperatura proporcionou características desejáveis para o produto final, sendo elas: o baixo teor de água e de atividade de água e uma maior preservação dos compostos bioquímicos do material.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, E.; AZIZPOUR, M. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. **LWT - Food Science and Technology**, v. 68, p. 105-110, 2016.
- ADESINA, J. M. Insecticidal potential of *Momordica chantaria* L. leaves powder against maize weevil *Sitophilus zeamais* (Mots.)(Coleoptera: Curculionidae) infestation. **International Journal of Biosciences**, v. 3, p. 28-34, 2013.
- AFFANDI, N.; ZZAMAN, W.; YANG, T. A.; EASA, A. M. Production of *Nigella sativa* beverage powder under foam mat drying using egg albumen as a foaming agent. **Beverages**, v. 3, n. 9, 2017
- ALEXANDRE, E. A.; OLIVEIRA, D. E.; RESENDE, O.; SILVA, M. A.; CASTRO, C. F.; JAKELAITIS, A. Drying kinetics of *Talinum triangulare* (Jacq.) Willd leaves and physicochemical assessment of flour. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, p. 1-8, 2019.
- ALEXANDRE, H. V.; SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P.; SILVA, O. S.; CARVALHO, J. P.; LIMA, E. E. Cinética de secagem do resíduo de abacaxi enriquecido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 640-646, 2013.
- ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; PEREIRA, T. S.; QUEIROGA, A. P. R.; RIBEIRO, V. H. A.; ARAÚJO, R. D. A.; CABRAL, M. B.; SILVA, L. R. I.; BORGES, E. M. E. S. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n.3, 2020.
- ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate CV 'Quintal' (*Persea Americana* Mill). **Revista Agrotecnologia**, v. 7, p.86-98, 2016.
- AMER, B. M.; GOTTSCHALK, K.; HOSSAIN, M. A. Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. **Renewable Energy**, v.121, p.539-547, 2018.
- AMIT, S. K.; UDDIN, M. M.; RAHMAN, R.; ISLAM, S. M. R.; KHAN, M. S. A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. **Agriculture & Food Security**. v. 6, n. 51, 2017.
- ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, p. 1-9, 2017.
- ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L.; CORRÊA, P. C.; HARTMANN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, p. 448-457, 2017.

ASSIS, J. P.; SOUSA, R. P.; LINHARES, P. C.; PEREIRA, M. F.; MOREIRA, J. C. Avaliação biométrica de caracteres do melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.). **Revista Brasileira de Plantas medicinais**, v. 17, p. 505-514, 2015.

AYETIGBO, O.; LATIF, S.; ABASS, A. MULLER, J. Preparation, optimization and characterization of foam from white-flesh and yellow-flesh cassava (*Manihot esculenta*) for powder production. **Food Hydrocolloids**, v. 97, p. 1-10, 2019.

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. H.; VARIDI, M. Foam-mat drying of shrimp: characterization and drying kinetics of foam. Agricultural **Engineering International: CIGR Journal**, v. 3, p. 159-165, 2013.

BAG, S. K.; SRIVASTAV, P. P.; MISHRA, H. N. Optimization of Process Parameters for Foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) Fruit Pulp. **Food Bioprocess Technology**, v. 4, p. 1450-1458, 2011.

BAHRIYE, G.; DADASHI, S.; DEHGHANNYA, J.; GHAFFARI, H. Influence of processing temperature on production of red beetroot powder as a natural red colorant using foam-mat drying: Experimental and modeling study. **Food Science & Nutrition**, v. 11, p. 6955-6973, 2023.

BAI, T.; WAN, Q.; LIU, X. B.; KE, R.; XIE, Y.; ZHANG, T.; HUANG, M.; ZHANG, J. Drying kinetics and attributes of fructus aurantii processed by hot air thin-layer drying at different temperatures. **Heliyon**, v.9, 2023.

BAKARE, R. I.; MAGBAGBEOLA, O. A.; AKINWANDE, A. I.; EBUEHI, O. A. Nutritional and chemical evaluation of *Momordica charantia*. **J. Med Plants Res**, v. 4, p. 2189-2193, 2010.

BATISTA, L. M.; VALENÇA, A. M. Fitoterapia no Âmbito da Atenção Básica no SUS: Realidades e Perspectivas. **Pesquisa Brasileira em Odontopediatria e Clínica Integrada**, v. 12, p. 293-296, 2012.

BEGUM, S.; AHMED, M.; SIDDIQUI, B. S.; KHAN, A.; SAIFY, Z. S.; ARIF, M. Triterpenes, a sterol and a monocyclic alcohol from *Momordica charantia*. **Phytochemistry**, v. 44, p. 1313-1320, 1997.

BENKOVIC, M.; PIZETA, M.; TUSEK, A. J.; JURINA, T.; KLJUSURIC, J. G.; VALINGER, D. Optimization of the foam mat drying process for production of coca powder enriched with peppermint extract. **LWT – Food Science and Technology**, v. 115, p. 1-10, 2019.

BHANDARI, B. (2006). **Handbook of industrial drying**. In A. S. Mujumdar (Ed.), Boca Raton, v. 33, 2006.

BHARDWAJ, A. K.; KUMAR, R.; CHAUHAN, R. Experimental investigation of the performance of a novel solar dryer for drying medicinal plants in Western Himalayan region. **Solar Energy**, v. 177, p. 395-407, 2019.

BHAT, G. H.; KHAN, H. A.; ALHOMIDA, A. S.; SHARMA, P.; SINGH, R.; PARAY, B. A. GLP-I secretion in healthy and diabetic Wistar rats in response to aqueous extract of *Momordica charantia*. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, v. 18, 2018.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT - Food Science and Technology**, v. 28, p.25-30, 1995.

BRAR, A. S.; KAUR, P.; KAUR, G.; SUBRAMANIAN, J.; KUMAR, D.; SINGH, A. Optimization of process parameters for foam-mat drying of peaches. **International Journal of Fruit Science**, v. 20, p. 1495–S1518, 2020.

BRANDÃO, D. O.; GUIMARÃES, G. P.; SANTOS, R. L.; RAMOS JÚNIOR, F. J. L.; SILVA, K. M. A.; SOUZA, F. S.; MACÊDO, R. O. Model analytical development for physical, chemical, and biological characterization of *Momordica charantia* vegetable drug. **Journal of Analytical Methods in Chemistry**, 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Lista de Denominação Comum Brasileira (DCB) para plantas medicinais**, 2017. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content%2FassetEntryId=3881905&\\_101\\_type=document](http://portal.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content%2FassetEntryId=3881905&_101_type=document). Acesso em: 21 setembro de 2019.

BRASIL, Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada - **RDC n. 26, de 13 de maio de 2014**. Dispõe sobre o requisito de medicamentos fitoterápicos e o registro e a notificação de produtos tradicionais fitoterápicos, Brasília – DF, 2014.

BRASIL, Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **Práticas integrativas e complementares: plantas medicinais e fitoterapia na Atenção Básica**. Série A. Normas e Manuais Técnicos - Cadernos de Atenção Básica, 2012. 156 p.

BRASIL, Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. Resolução da Diretoria Colegiada - **RDC n.10, de 09 de março de 2010**. Dispõe sobre a notificação de drogas vegetais junto à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e dá outras providências, Brasília - D.F, 2010.

BRASIL, Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa). Cartilha sobre boas práticas para serviços de alimentação. Resolução-RDC n° 216/2004. Brasília –DF, 2004.

BULJAT, A. M.; JURINA, T.; TUSEK, A. J.; VALINGER, D.; KLJUSURIC, J. G.; BENKOVIC, M. Applicability of foam mat drying process for production of instant cocoa powder enriched with lavender extract. **Food Technology & Biotechnology**, v.57, n. 2, p. 159-170, 2019.

CAGNIN, C.; LIMA, M. S.; SILVA, R. M.; SILVA, M. A. P.; PLÁCIDO, G. R.; FREITAS, B. S. M.; OLIVEIRA, D. E. C. Garlic: Kinetic drying and thermodynamic properties. **Bioscience Journal**, v. 33, p. 905-913, 2017.

CANO-CHAUCA, M.; STRINGUETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDAL, J. Effect of the carries on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 6, p. 420-428, 2005.

CASTRO, D. S.; SILVA, L. M. M.; MOREIRA, I. S.; SOUSA, F. C.; SILVA, W.P. & ALMEIDA, F. A. C. Análise e descrição matemática da secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophylla* (Lam.) eyma.) em camada fina. **ENGEVISTA**, v. 18, n. 2, p. 309-317, 2016.

CEI-RD, C. **Perfil Económico de Vegetales Orientales**. Republica Dominicana: CEI-RD, 2007. 43 p.

CELESTINO, S. M. **Princípios de Secagem de Alimentos**. 1ª ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.

CELOTO, M. I.; PAPA, M. F.; SACRAMENTO, L. V.; CELOTO, F. J. Atividade antifúngica de extratos de plantas a *Colletotrichum gloeosporioides*. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 1-5, 2008.

CHANG, C.; CHEN, C.; LIAO, Y.; SHIH, W.; CHENG, H.; TZENG, C.Y.; LI, J.W.; KUNG, M.T. Octanorcucurbitane triterpenoids protect against t-BHP-induced hepatotoxicity from the stems of *Momordica charantia*. **Chemical & Pharmaceutical Bulletin**, v.58, p.225-229, 2010

CHANG, C.; CHEN, C.; LIAO, Y.; CHENG, H.; CHEN, Y.; CHOU, C. H. Cucurbitane-type triterpenoids from the stems of *Momordica charantia*. **Journal of Natural Products**, v. 71, p. 1327-1330, 2008.

CHANG, C. I.; CHEN, C. R.; LIAO, Y. W.; CHENG, H. L.; CHEN, Y. C.; CHOU, C. H. Curcubitan-type triterpenoids from the stems of *Momordica charantia*. **Journal of Natural Products**, v. 69, p. 1168-1171, 2006.

CHEN, J C; LIU, W. Q; LU, L.; QIU, M. H.; ZHENG, Y.T.; YANG, L.M.; ZHANG, X.M.; ZHOU, L.; LI, Z. R. Kuguacins F–S, cucurbitane triterpenoids from *Momordica charantia*. **Phytochemistry**, v. 70, p. 133-140, 2009.

CHEN, J.; TIAN, R.; QIU, M.; LU, L.; ZHENG, Y.; ZHANG, Z. Trinorcucurbitane and cucurbitane triterpenoids from the roots of *Momordica charantia*. **Phytochemistry**, v. 69, p. 1043-1048, 2008.

CHENG, J. C.; KUO, C. Y.; LIAO, Y. W. A hypoglycemic triterpene isolated from *Momordica charantia* wild variant, attenuates TNF- $\alpha$ -induced inflammation in FL83B cells in an AMP-activated protein kinase-independent manner [J]. **Eur J Pharmacol**, p.241-248, 2012.

CHUA, L. Y. W.; CHUA, B. L.; FIGIEL, A.; CHONG, C. H.; WOJDYLO, A.; SZUMNY, A.; LYCZKO, A. Drying of *Phyllanthus nodiflorus* Leaves: Antioxidant Activity, Volatile and Phytosterol Content, Energy Consumption, and Quality Studies. **Processes**, v. 7, 2019.

COELHO, B. E.; TORRES, G. S.; FIGUEIREDO NETO, A.; COELHO, C. L. Estudo da estabilidade da espuma da polpa de acerola para secagem pelo método *foam-mat drying*. **Revista Caribeiras de Agroecologia**, v. 4, p. 1-6, 2019.

CORRÊA, P. C.; BAPTESTINI, F. M.; ZEYMER, J. S.; ARAUJO, M. E.; REITAS, R. C.; LEITE, R. A. Dehydration of infrared ginger slices: Heat and mass Transfer coefficient and modeling. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, p. 1-11, 2019.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, p. 595-601, 2010.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2<sup>a</sup> ed. Londres . Oxford University Press. 421 p., 1975.

DANTAS, S. C. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DARNIADI, S.; HO, P.; MURRAY, B. S. Comparison of blueberry powder produced via foam-mat freeze-drying versus spray-drying: evaluation of foam and powder properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, p. 2002-2010, 2017.

DEGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 135, p. 30-43, 2019.

DEGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. **Journal of Food Engineering**, v. 238, p. 164-177, 2018.

DENG, L. Z.; YANG, X. H.; MUJUMDAR, A. S.; ZHAO, J. H.; WANG, D.; ZHANG, Q.; WANG, J.; GAO, Z. J.; XIAO, H. W. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. **Drying Technology**, v. 36, p. 893-907, 2017.

DJAENI, M.; KUMORO, A. C.; SASONGKO, S. B.; UTARI, F. D. Drying rate and product quality evaluation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) calyces extract dried with foaming agent under different temperatures. **International Journal of Food Science**, v. 2018, p. 1-8, 2018.

EASTMAN, J. E.; MOORE, C. O. **Cold Water Soluble Granular Starch for Gelled Food Composition**. U.S. Patente 4465702, 14 de agosto. 1984.

EL-MESERY, H S.; ASHIAGBOR, K.; HU, Z.; ROSTOM, M. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer. **Journal of Food Science**, v. 89, p. 1658-1671, 2024.

FALADE, K. O.; ADEYANJU, K. I.; UZO-PETTERS P. I. Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glyceryl monostearate and egg albumin as foaming agents. **European Food Research and Technology**, v. 217, p. 486-491, 2003

FEBRIANTO, A.; KUMALANINGSIH, S.; ASWARI, A. W. Process engineering of drying milk powder with foam mat drying method: A study of the effect of the concentration and types of filler. **Journal of Basic and Applied Scientific Research**, v. 2, p. 3588-3592, 2012.

FERNANDES, T. K. S.; PÊ, P. R.; ROCHA, A. P. T. Comportamento da secagem da hortelã da folha miúda. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.8, p. 36-40, 2013.

FERREIRA JÚNIOR, W. N.; RESENDE, O.; PINHEIRO, G. K. I.; SILVA, L. C. M.; SOUZA, D. G.; SOUSA, K. A. Modeling and thermodynamic properties of the drying of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 37-43, 2021.

FRANCO, T. S. **Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma**. 192 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FRANCO, T. S.; PERUSSELLO, C. A.; ELLENDERSEN, L. N.; MASSON, M. L. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. **LWT- Food Science and Technology**, v. 66, p. 503-513, 2016.

GROVER, J. K.; YADAV, S. P. Pharmacological actions and potential uses of *Momordica charantia*: a review. **Journal of Ethnopharmacology**, v.1, p. 123-132, 2004.

GUIMARÃES, R. M.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SILVA, J. S.; REZENDE, T. A. M.; EGEA, M. B. Thermodynamic properties and drying kinetics of “okara”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 418-423, 2018.

GULDANE, M.; BOZKIR, H. Drying of cherry laurel juice using foam mat drying technique and investigating the effect of drying temperature on drying characteristics and bioactive components. **The Journal of Food**, v.49, p. 88-100, 2024.

GURGEL, C. E.; DIEB, J. T.; MACHADO, A. K.; MEDEIROS, M. F. Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma: avaliação dos parâmetros de secagem. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 2, p. 1796-1805, 2015.

GUSHIKEN, L. F.; BESERRA, F. P.; ROZZA, A. L.; BÉRGAMO, P. L.; BÉRGAMO, D. A. Chemical and biological aspects of extracts from medicinal plants with antidiabetic effects. **Rev Diabetic Stud**, v. 13, p. 96-112, 2016.

HAMZEH, S.; MOTAMEDZADEGAN, A.; SHAHIDI, S.; AHMADI, M.; REGENSTEIN, J. M. Effects of drying condition on physico-chemical properties of foam-mat dried shrimp powder. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 28, 7 ed., p. 1-12, 2019

HARINANTENAINA, L.; TANAKA, M.; TAKAOKA, S.; ODA, M.; MOGAMI, O.; UCHIDA, M.; ASAKAWA, Y. *Momordica charantia* constituents and antidiabetic screening of the isolated major compounds. **Chemical & Pharmaceutical Bulletin**, v. 54, p. 1017-1021, 2006.

HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. Foam-mat drying technology: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, 12 ed., 2015.

HASAN, M. U.; MALIK, A. U.; ALI, S.; IMTIAZ, A.; MUNIR, A.; AMJAD, W.; ANWAR, R. Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. **Journal Food Processing and Preservation**, 2019.

IAL. Instituto Adolf Lutz. **Métodos físicos-químicos para análises de alimentos**. 1ª ed. Digital. São Paulo, 2008.

INDRIANTI, N.; PUTRI, D. P.; YULIANTI, L. E.; AFIFAH, N.; RATNAWATI, L.; SARIFUDIN, A.; PUTRI, S. K. D. F. A.; ARTATI, D.; SUPRIYANTO, S.; SUKARTA, D. Optimization of Foam Properties and Evaluation of the Drying Temperature Effects on the Foam-Mat Drying of Pasta Sauce. **AgriTech**, v. 43, p. 238-250, 2023.

JESUS, S. C.; MENDONÇA, F. A.; MOREIRA, J. O. Atividade inseticida e modos de ação de extratos vegetais sobre mosca branca (*Bemisia tabaci*). **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.6, p.117-134, 2013.

JIA, S.; SHEN, M.; ZHANG, F.; XIE, J. Recent advances in *Momordica charantia*: functional components and biological activities. **Int J Mol Sci**, v. 18, p. 1-25, 2017.

JORGE, L.; SAKUMA, A. M.; INOMATA, E. I. Análise histológica e bioquímica de *Momordica charantia* L (melão de são Caetano). **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 52, p. 23-26, 1992.

JOSEPH, B.; JINI, D. Antidiabetic effects of *Momordica charantia* (bitter melon) and its medicinal potency. **Asian Pac J Trop Dis**, v. 3, p. 93-102, 2013.

JUSTINE, V. T.; MUSTAFA, M.; KANKARA, S. S.; GO, R. Effect of Drying Methods and Extraction Solvents on Phenolic Antioxidants and Antioxidant Activity of *Scurrula ferruginea* (Jack) Danser (Loranthaceae) Leaf Extracts. **Sains Malaysiana**, v. 48, p. 1383-1393, 2019.

KABA, B.; YIKILKAN, Y.; PASHAZADEH, H.; REDHA, A. A.; KOCA, I. Production of cornelian cherry (*Cornus mas* L.) pulp powder by foam-mat drying: analysis of physicochemical and antioxidant properties. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2023.

KADAM D. M.; BALASUBRAMANIAN, S. Foam mat drying of tomato juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, n. 4, p. 488-495, 2011.

KAGAWA, N.; IGUCHI, H.; HENZAN, M.; HANAOKA, M. Drying the leaves of *Perilla frutescens* increases their content of anticancer nutraceuticals. **Food Science & Nutrition**, v. 7, p. 1494-1501, 2019.

KANDASAMY, P.; VARADHARAJU, N.; KALEMULLAH, S. Foam-mat drying of papaya (*Carica papaya* L.) using glycerol monostearate as foaming agent. **Food Science and Quality Management**, v. 9, p. 17-27, 2012.

KEEY, R. B. Drying of Loose and Particulate Materials. **Journal Drying Technology**, v. 10, p.1139-1141, 1992.

KHAN, B. M.; BAKHT, J. Effect of sun-drying on anti-fungal, anti-yeast and antioxidant potency of acorus calamus, an indigenous medicinal plant. **Pakistan Journal of Botany**, v. 51, p.313-317, 2019.

KHODIFAD, B. C.; KUMAR, N. Foaming properties of custard apple pulp and mathematical modelling of foam mat drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 2, p. 526-536, 2020.

KIM, J. H.; LIM, Y. J.; DUAN, S.; PARK, T. J.; EOM, S. H. Accumulation of antioxidative phenolics and carotenoids using thermal processing in different stages of *Momordica charantia* Fruit. **Molecules**, v. 28, 2023.

KOÇ, M.; ELMAS, F.; VARHAN, E. Drying of fig with microwave and hot air assisted foam-mat drying method. **Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology**, v.7, n. 2, p. 291-300, 2019.

KUDRA, T.; RATTI, C. Process and energy optimization in drying of foamed materials. **Transactions of the Tambov State Technical University**, v. 14, p. 812-819, 2008.

KUDRA, T.; RATTI, C. Foam-mat drying: Energy and cost analyses. **Canadian Biosystems Engineering**, v. 48, p. 27-32, 2006.

KULKARNI, P.; LOHIDASAN, S.; MAHADIK, K. Isolation, characterisation and investigation of in vitro antidiabetic and antioxidant activity of phytoconstituents from fruit of *Momordica charantia* Linn. **Natural Product Research**, v. 2, p. 1-3, 2019.

KWATRA, D.; DANDAWATE, P.; PADHYE, S.; ANANT, S. Bitter Melon as a Therapy for Diabetes, Inflammation, and Cancer: a Panacea **Current Pharmacology Reports**, v. 2, n. 1, p. 34-44, 2016.

LEITE, A. C. N.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; PINHEIRO, W. S. Cinética de secagem em camada de espuma da *Mentha crispa* e ajuste de modelos matemáticos. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.30, p.1-18, 2023.

LIMA, A. C. F.; OLIVEIRA, B. F.; SILVA, W. K. V.; BONFIM, K. S.; NÓBREGA, M. M. G.; SILVA, Y. T. F.; CAVALCANTE, J. A.; CORNÉLIO, M. L. Secagem em camada

de espuma da folha do noni (*Morinda citrifolia* L.). **Revista Observatório de La Economia Latinoamericana**, v.22, n.1, p. 345 – 370, 2024.

LIU, H.; WANG, G. C.; ZHANG, M. X.; LING, B. The cytotoxicology of momordicins I and II on *Spodoptera litura* cultured cell line SL-1. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 122, p.110-118, 2015.

LOBO, F.; NASCIMENTO, M. A.; DOMINGUES, J. R.; FALCÃO, D. Q.; HERNANZ, D.; HEREDIA, F. J.; ARAUJO, K. G. L. Foam mat drying of Tommy Atkins mango: Effects of air temperature and concentrations of soy lecithin and carboxymethylcellulose on phenolic composition, mangiferin, and antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v. 221, p. 258-266, 2017.

LV, H.; MA, J.; LV, W.; LV, H.; ZHAO, D.; ZHAO, D. Effect of pretreatment methods on the moisture state and drying quality of balsam pear (*Momordica charantia* L.) Slices Using Microwave Vibratory Fluidized Bed. **International Journal of Food Engineering**, v. 15, p. 1-10, 2019.

LYCZKO, J.; JALOSZYNSKI, K.; SURMA, M.; MASZTALERZ, K.; SZUMNY, A. HS-SPME Analysis of True Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) Leaves Treated by Various Drying Metho. **Molecules**, v.24, p.1-13, 2019.

MABASSO, G. A.; CABRAL, J. C. O.; BARBOSA, K. F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; ALMEIDA, A. B. Drying kinetics, thermodynamic properties and physicochemical characteristics of Rue leaves. **Scientific Reports**, v. 14, 2024.

MACIEL, R. M. G.; AFONSO, M. R. A.; COSTA, J. M. C.; SEVERO, L. S.; LIMA, N. D. Mathematical modeling of the foam-mat drying curves of guava pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 10, p. 721-725, 2017.

MACEDO, L. L.; CORRÊA, J. L. G.; ARAÚJO, C. S.; VIMERCATI, W. C.; PIO, L. A. S. Process optimization and ethanol use for obtaining white and red dragon fruit powder by foam mat drying. **Journal of Food Science**, v. 86, 2021.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p. 75-97, 1996.

MAIA, R. R.; PEREIRA, M. S.; HIGINO, J. S.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. P.; ALBUQUERQUE, A. C.; PEREIRA, L. F.; MACEDO-COSTA, M. R.; PEREIRA, A. V. Efeito antimicrobiano do extrato de *Momordica charantia* L isolado e em associação com antibióticos sobre *Staphylococcus aureus* multirresistentes. **ACSA - Agropecuária científica no semi-árido**, v.4, p. 12-17, 2008.

MALIK, M.; SHARMA, A. Optimisation of foam-mat drying of yoghurt and properties of powdered yoghurt. **International Journal of Dairy Technology**, v.72, 2019.

MANEENIN, C.; BURAWAT, J.; MANEENIN, N.; NUALKAEW, S.; ARUN, S.; SAMPANNANG, A., IAMSAAR, S . Antioxidant Capacity of *Momordica charantia* Extract and its Protective Effect on Testicular Damage in Valproic Acid-Induced Rats. **International Journal of Morphology**, v. 36, p. 447-453, 2018.

MANGUEIRA, E. R.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; LIMA, A. G. B. Foam-mat drying process of duck egg white. **Diffusion Foundations**, v. 25, p. 54-82, 2020.

MARINOVA, E.; VAN DER VALK, J. M. A.; VALAMOTI, S. M.; BRETSCHEIDER, J. An experimental approach for tracing olive processing residues in the archaeobotanical record, with preliminary examples from Tell Tweini, Syria, **Vegetation History and Archaeobotany**, v. 20, n. 5, p. 471-478, 2011.

MARQUES, G. M.; ARRUDA, R. S.; SILVA, A. A. Secagem de caldo de cana em leito de espuma e caracterização físico-química do produto. **Brazilian Journal of Food Research**, v.7, p. 16-29, 2016.

MARTINS, F. P.; BOSCH NETO, J. C.; SILVA, A. J. O.; SIQUEIRA, M. O. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v.6, 2020.

MARTINS, E. A.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L.; HATMANN FILHO, C. P.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 238-244, 2015.

MATHEW, A. A.; THANGAVEL, V. Investigation on indirect natural convection solar drying of anti-diabetic medicinal products. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2019.

McMINN, W. A.; AL-MUHTASEB, A. H.; MAGGE, T. R. Enthalpy–entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Food Research International**, v. 38, n. 5, p. 505-510, 2005.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.12, n.8, p. 1254-1260, 1980.

MIYAHARA, Y.; OKABE, H.; YAMAUCHI, T. Studies on the constituents of *Momordica charantia*. Isolation and characterization of minor seed glycosides, momordicosides C, D and E. **Chemical & Pharmaceutical Bulletin**, v.29, p.1561-1566. 1981.

MORAIS, M. F. S.; SANTOS, J. R. O.; SANTOS, M. P.; SANTOS, D. C.; COSTA, T. N.; LIMA, J. B. Modeling and thermodynamic properties of “bacaba” pulp drying. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental e Ambiental*, v. 23, p. 702-708, 2019.

MORGAN, A. L.; GRAHAM, R. P.; GINETTE, L. F.; WILLIAMS, G. S. Recent developments in foam-mat drying. **Food Technol**, v.15, p.37-39, 1961.

MOSCON, E. S.; MARTIN, S.; SPEHAR, C. R.; DEVILLA, I. A.; RODOLFO JUNIOR, F. Cinética de secagem de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* w.). **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n.4, p. 318-328, 2017.

MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. Drying technology: Trends and applications in postharvest processing. **Food and Bioprocess Technology**, v. 3, n. 6, p. 843-852, 2010.

MUN, S. H.; JOUNG, D. K.; KIM, Y. S. Synergistic antibacterial effect of curcumin against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. **Phytomedicine**, v. 20, p. 714-718, 1961, 2013.

MURAKAMI, T.; EMOTO, A.; MATSUDA, H.; YOSHIKAWA, M. Structures of new cucurbitane-type triterpene glycosides, goyaglycosides-a, -b, -c, -d, -e, -f, -g, and -h, and new oleanane-type triterpene saponins, goyasaponins I, II, and III, from the fresh fruit of Japanese *Momordica char*. **Chemical & Pharmaceutical Bulletin**, v. 49, p. 54-63, 2001.

NASCIMENTO, V. R.; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 686-692, 2015.

NEGREIROS, J. K. S.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; OLIVEIRA, B. F.; ALMEIDA, E. C. C.; LIMA, R. M.; ALVES, R. I. D. **Bandeja para secagem em camada de espuma**. Pedido de Depósito de Patente, BR 1020190275529, 20 de dezembro, 2019.

NEPOMOCENO, T. A.; PIETROBON, A. J. Aspectos gerais do melão de São Caetano (*Momordica charantia* L.). In: 12ª Semana acadêmica de agronomia - SEAGRO, 2018, Cascavel. **Anais da SEAGRO**, 2018, p. 111-114.

NEWALL, C. A.; ANDERSON, L. A.; PHILLIPSON, J. D. **Fitoterapia - Plantas medicinais: guia para profissional da saúde**. 1ª ed. São Paulo: Premier, 2002. 308 p.

NG, M. L.; SULAIMAN, R. Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. **LWT- Food Science and Technology**, v. 88, p. 80-86, 2018.

NGUYEN, T. V. L.; NGUYEN Q. D.; NGUYEN, P. B. D.; TRAN, B. L.; HUYNH, P. T. Effects of drying conditions in low-temperature microwave assisted drying on bioactive compounds and antioxidant activity of dehydrated bitter melon (*Momordica charantia* L.). **Food Science & Nutrition**, 2020.

NGUYEN, T. V.; NGUYEN, M. D.; NGUYEN, D. C.; BACH, L. G.; LAM, T. D. Model for Thin Layer Drying of Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) by Hot Air. **Processes**, v.7, p. 1-11, 2019.

OKABE, H.; MIYAHARA, Y.; YAMAUCHI, T.; MIYAHARA, K.; KAWASAKI, T. Studies on the constituents of *Momordica charantia* L. I. Isolation and characterization of momordicosides A and B, glycosides of a pentahydroxy-cucurbitane triterpene. **Chemical & Pharmaceutical Bulletin**, v.28, p.2753-2762, 1980.

OLANIYAN, A. M.; ADEOTI, J. A.; SUNMONU, M. O. Effect of foaming agent, foam stabilizer and whipping time on drying process of tomato paste under different drying equipment. **Internatioinal Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing**, v. 18, n. 2, p. 1-15, 2017

OLIVEIRA, B. F.; NEGREIROS, J. K. S.; BONFIM, K. S.; CAVALCANTE, J. A.; PINTO, M. F.; COSTA, N. A. Modelagem matemática da cinética de secagem em camada

de espuma da folha da gravioleira (*Annona muricata* Linn) e caracterização do pó obtido. **Research, Society and Development**, v. 9, n.4, p. 1-27, 2020.

OLIVEIRA, G. H.; ARAGÃO, D. M.; OLIVEIRA, A. P.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, p. 314-321, 2015.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 181-189, 2006.

Omidi, S.; Jeshvghani, A. A.; Dizji, H. Z.; Shahdadi, F. Producing beetroot powder by using foaming agent maltodextrin and milk protein concentrate in foam mat-microwave drying method. **Innovative Food Technologies**, v. 11, 2024.

OSHIRO, L. P.; MIGUEL, M. D.; DIAS, J. F.; GOMES, E. C.; MIGUEL, O. G. A evolução do registro e prescrição de fitoterápicos no Brasil sob a perspectiva legal e sanitária. **Revista Visa em debate: sociedade, ciência e tecnologia**, v. 4, n. 4, p. 116-122, 2016.

OZCELIK, M.; AMBROS, S.; MORAIS, F. S. I.; KULOZIK, U. Storage stability of dried raspberry foam as a snack product: Effect of foam structure and microwave-assisted freeze drying on the stability of plant bioactives and ascorbic acid. **Journal of Food Engineering**, v. 270, p. 1-9, 2020.

OZCELIK, M.; HEIGL, A.; KULOZIK, U.; AMBROS, S. Effect of hydrocolloid addition and microwave-assisted freeze drying on the characteristics of foamed raspberry puree. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 56, p. 1-11, 2019.

PAHLAVANI, N.; ROUDI, F.; ZAKERIAN, M.; FERNS, G. A.; NAVASHENAG, J. G.; MASHKOURI, A.; GHAYOUR-MOBRHAN, M.; RAHIMI, H. Possible molecular mechanisms of glucose-lowering activities of *Momordica charantia* (karela) in diabetes. **Journal of Cellular Biochemistry**, p. 1-9, 2019.

PAIVA, Y. F.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; AMADEU, L. T. S.; REIS, C. G.; SANTOS, F. S.; LIMA, A. G. B.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P.; LEITE, D. D. F. Tropical red fruit blend foam mat drying: effect of combination of additives and drying temperatures. **Foods**, v. 12, 2023.

PARK, S. H.; YI, Y.; KIM, M.; CHO, J. Y. Antioxidative and Antimelanogenesis Effect of *Momordica charantia* Methanol Extract. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2019, p. 1-11, 2019.

PARK, K. J.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F.; CORNEJO, F. E.; FABBRO, I. M. Secagem: Fundamentos e Equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, p. 93-127, 2014.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. Obtenção das isoterma de sorção e modelagem matemática para a pêra barlett (*Pyrus cp.*) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia do Alimentos**, v.21, p. 73-77, 2001.

PEREIRA, T. S.; PINHEIRO, W. S.; NEGREIROS, J. K.; SOUSA, C. C.; CAVALCANTE, J. A. Caracterização de clara de ovo e do seu pó obtido por secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.19, p. 167-175, 2017.

PURBASARI, D.; ARDHYANSYAH, G. Physical Quality of Tomato Powder (*Lycopersicum Esculentum* Mill.) Produced by Foam-Mat Drying Method Using Convection Oven. **Jurnal Teknik Pertanian Lampung**, v. 13, p. 329-338, 2024.

QADRI, O. S.; SRIVASTAVA, A. K.; YOUSUF, B. Trends in foam mat drying of foods: Special emphasis on hybrid foam mat drying technology. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, p. 1-10, 2019.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 1452-1459, 2007.

RANDUCANU, C. E.; PÂRVULESCU, O. C.; DOBRE, T.; DUMITRU, I.; DRAGUSIN, F. Air drying of aromatic plants coupled with recovery of volatile compounds. **Bulletin of Romanian Chemical Engineering Society**, v. 5, p.58-67, 2018.

RAO, C. V. Immunomodulatory effects of *Momordica charantia* extract in the prevention of oral cancer. **Association for Cancer Research**, v. 11, n. 4, p. 185-186, 2018.

RATES, S. M. Promoção do uso racional de fitoterápicos: uma abordagem no ensino da Farmacognosia. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 11, p. 57-69, 2001.

RATTI, C.; KUDRA, T. Drying of Foamed Biological Materials: Opportunities and Challenges. **Drying Technology: An International Journal**, v. 24, p. 1101-1108, 2006.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 347-353, 2011.

RIGUETO, C. V. T.; NAZARI, M. T.; EVARISTO, L. M.; ROSSETTO, M.; DETTMER, A.; GERALDI, C. A. Q.; PICCIN, J. S. Influencia de la temperatura de secado del jambo rojo (*Syzygium malaccense*) en la capa de espuma. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. 1-14, 2020.

ROBINSON, R.; DECKERS-WALTER, D. **Cucurbits**. New York: Cab International, 1997, 226 p.

ROMULO, A.; AURELLIA, C. A. Effect of Maltodextrin and Egg White Powder on Physical Characteristics of Sorghum Powdered Drink. **BIO Web of Conferences**, v.98, 2024.

SALAH, M. R.; MOHEBBI, M.; TAGHIZADEH, M. Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) pulp powder using foam mat drying method: Effects of drying conditions

on microstructural of mat and physico-chemical properties of powder. **Drying Technology - An International Journal**, v. 35, 15 ed., 2017.

SANGAMITHRA, A.; VENKATACHALAM, S.; JOHN, S. G.; KUPPUSWAMY, K. Foam mat drying of food materials: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, p. 3165-3174, 2014.

SANTOS S. F.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; REIS, C. G.; AMADEU, L. T. S.; SILVA, L. P. F. R.; LIMA, T. L. B. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas na secagem do quiabo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, p. 91-100, 2021.

SANTOS, D. C.; LEITE, D. D.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P.; SANTOS, F. S.; LIMA, T. L.B.; FIGUEIRDO, R, M, F.; COSTA, T. N. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, p. 1-12, 2019a.

SANTOS, D. C.; COSTA, T. N; FRANCO, F. B.; CASTRO, R. C.; FERREIRA, J. P. L.; SOUZA, M. A. S.; SANTOS, J. C. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of patawa pulp (*Oenocarpus bataua Mart.*). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, 2019b.

SANTOS, C. A.; SILVA, A. P. Extratos vegetais de plantas daninhas contra o pulgão *Aphis craccivora koch 1854*, no feijão *Vigna unguiculata L.* **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 6, p.69-75, 2015.

SANTOS, S. F. **Estudo da produção de pectinase por fermentação em estado sólido utilizando pedúnculo de caju como substrato**. 148p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal , 2007.

SEERANGURAYAR, T.; MANICKAVASAGAN, A.; AL-ISMAILI, A. M.; AL-MULLA, Y. A. Effect of carrier agents on physicochemical properties of foam-mat freeze-dried date powder. **Drying Technology- An International Journal**, v. 36, 11 ed., p. 1291-1303, 2017.

SERRA NEWS. Conheça as propriedades e benefícios do melão de São Caetano. 16 abril 2018. Disponível em: <https://www.serranews.rj.com.br/2018/04/propriedades-e-beneficios-do-melao-de-sao-caetano.html>. Acesso em: 11 out. 2019.

SHAFAEI, S. M.; MASOUMI, A. A.; ROSHAN, H. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 15, p. 135-144, 2016.

SILVA, A. B. S.; SILVA, E. G. S.; RIGO, L.; LOSS, R. A.; GUEDES, S. F.; PAULA, J. M.; GERALDI, C. A. Q. Techniques of drying fruits: A review. **Scientific Electronic Archives**, v.14, 2021.

SILVA, N. C.; SANTOS, S. G.; SILVA, D. P.; SILVA, I. L.; RODOVALHO, R. S. Drying kinetics and thermodynamic properties of boldo leaves (*Plectranthus barbatus Andrews*). **Científica**, v.47, p. 1-7, 2019.

SILVA, I. L.; SILVA, H. W.; CAMARGO, F. R.; FARIAS, H. F.; FREITAS, E. F. Secagem e difusividade de sementes de melão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, p. 309-315, 2018.

SILVA, F. P. D.; SIQUEIRA, V. C.; MARTINS, E. A.; MIRANDA, F.; MELO, R. M. Thermodynamic properties and drying kinetics of *Bauhinia forficata* Link leaves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p. 61–67, 2017.

SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S.; VELASCO, M. F.; SILVA, C. F.; VALE, L. S. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of ‘Cabacinha’ pepper fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 174-180, 2016.

SILVA, J. S. **Secagem de armazenagem de produtos agrícolas**. 2ª ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

SOUZA, L. M. R.; CANUTO, M. F. C. S.; SILVA, D. R. S.; FARIAS, F. P. M.; SANTOS, F. S. Secagem da polpa do umbu (*Spondia tuberosa*) em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 10, 2021.

SOUZA, T. T. C.; MONTEIRO, E. R.; RIBEIRO, C. T.; SOUZA, D. S.; SANTOS, T. T. Modelling and thermodynamic properties of the drying of epicarp, mesocarp and endocarp of tucumã (*Astrocaryum aculeatum*). **Brazilian Journal of Food Technology**, v.24, 2021.

SOUSA, A. D.; RIBEIRO, P. R.; CANUTO, K. M.; ZOCCOLO, G. J.; PEREIRA, R. C.; FERNANDES, F. A. N.; BRITO, E. S. Drying Kinetics and Effect of Air-Drying Temperature on Chemical Composition of *Phyllanthus amarus* and *Phyllanthus niruri*. **Drying Tecnology**, v. 36, p. 609-616, 2018.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448 p.

TABALDI, L. A.; VIEIRA, M. C.; ZÁRATE, N. A.; SILVA, L. R.; GONÇALVES, W. L.; PILECCO, M.; FORMAGIO, A. S. N.; GASSI, R. P.; PADOVAN, M. P. Cover crops and their effects on the biomass yield of *Serjania*. **Ciência Rural**, v. 42, p. 614-620, 2012.

TABARI, M. G.; HAMZEH, S. Foam mat drying of orange juice using cress seed gum and egg albumin. **Journal of Food Science and Technology (Iran)**, v.21, n.174, 2024.

TAN, S. L.; SULAIMAN, R. Color and rehydration characteristics of natural red colorant of foam mat dried *Hibiscus sabdariffa* L. powder. **International Journal of Fruit Science**, v. 20, 1 ed., p. 89-105, 2019.

TAN, M. J.; YE, J. M.; TURNER, N.; HOHNEN-BEHRENS, C.; KE, C. Q.; TANG, C. P.; CHEN, T; WEISS, H C; GESING, E R; ROWLAND, A; JAMES, D E, YE, Y.

Antidiabetic activities of triterpenoids isolated from bitter melon associated with activation of the AMPK pathway. **Chemistry & Biology**, v. 15, p. 263-273, 2008.

TAVARES, I. M. C.; SUMERE, B. R.; GÓMEZ-ALONSO, S.; GOMES, E.; HERMOSÍN-GUTIÉRREZ, I.; DA-SILVA, R.; LAGO-VANZELA, E. S. Storage stability of the phenolic compounds, color and antioxidant activity of jambolan juice powder obtained by foam mat drying. **Food Research International**, v. 128, p. 1-9, 2020.

TAVARES, I. M.; CASTILHOS, M. B.; MAURO, M. A.; RAMOS, A. M.; SOUZA, R. T.; ALONSO, S. G.; GOMES, E.; SILVA, R.; HERMOSÍN-GUTIÉRREZ, I.; LAGO-VANZELA, E. S. BRS Violeta (BRS Rúbea×IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying. Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 298, p. 1-11, 2019.

THENT, Z. C.; DAS, S.; ZAIDUN, N. H. Emerging trends on drug delivery strategy of momordica charantia against diabetes and its complications. **Curr Drug Delivery**, v. 15, p.453-460, 2018.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of foaming agents and foam density on drying characteristics and textural property of banana foams. **LWT - Food Science and Technology**, v. 47, p. 348-357, 2012.

THUY, N. M.; TIEN, V. Q.; TAI, N. V.; MINH, V. Q. Effect of Foaming Conditions on Foam Properties and Drying Behavior of Powder from Magenta (*Peristrophe roxburghiana*) Leaves Extracts. **Horticulturae**, v.8, 2022.

TUNCKAL, C.; DOYMAZ, I. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. **Renewable Energy**, p. 918-923, 2020.

VARHAN, E.; ELMAS, F.; KOÇ, M. Foam mat drying of fig fruit: Optimization of foam composition and physicochemical properties of fig powder. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, 4 ed., p. 1-13, 2019.

VIEIRA, A. P.; NICOLETI, J. F.; TELIS, V. R. Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto. **Brasilian Journal of Food Technology**, v.15, p. 50-58, 2012.

VOIDALESKI, M.; GELINSKI, J. L.; SALAMONI, S. P.; MITIDIÉRI, S. Avaliação in vitro de extratos de melão-de-são-caetano (*Momordica charantia* L.): potencial antibacteriano e de inibição da formação de biofilmes. In: International Symposium on Science and Biotechnology, 1, 2015, Videira, **Anais...Videira: UNUESC**, 2015, p.49-50.

WANG, S.; ZHENG, Y.; XIANG, F.; LI, S.; YANG, G. Antifungal activity of Momordica charantia seed extracts toward the pathogenic fungus *Fusarium solani* L. **Journal of Food and Drug Analysis**, v.24, p.881-887, 2016.

WATHARKAR, R. B.; CHAKRABORTY, S.; SRIVASTAV, P. P.; SRIVASTAVA, B. Foaming and foam mat drying characteristics of ripe banana [*Musa balbisiana* (BB)] pulp. **Food Process Engineering**, 2021.

YAN, J. K.; WU, L. X.; QIAO, Z. R.; CAI, W. A.; MA, H. Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) slices. **Food Chemistry**, v. 271, p. 588-596, 2019.

YASUDA, M.; IWAMOTO, M.; OKABE, H.; YAMAUCHI, T. Structures of momordicines I, II and III, the bitter principles in the leaves and vines of *Momordica charantia* L. **Chemical & Pharmaceutical Bulletin**, v.32, p.2044-2047, 1984.

YOSHIME, L. T.; MELO, I. L.; SATTLER, J. A.; TORRES, R. P.; MANCINI FILHO, J. Bioactive compounds and the antioxidant capacities of seed oils from pomegranate (*Punica granatum* L.) and bitter gourd (*Momordica charantia* L.). **Food Science and Technology**, 2018.

YOUN, K. S.; PARK, E. H.; YOON, K. Y. Quality characteristics and antioxidant activity of bitter melon (*Momordica charantia* L.) dried by different methods. **The Korean Society of Food Preservation**, v. 26, 2019.

YUWAI, K.; RAO, K.; KALUWIN, C.; JONES, G.; RIVETT, D. Chemical compositions of *Momordica charantia* L. fruits. **J. Agric. Food Chem**, v.39, p. 1762-1763, 1991.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, p. 2225–2253, 1996.