



**GABRIEL PEDROSO DE LIMA ALEXANDRE**

**AVALIAÇÃO DO USO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHO  
NA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA POLPA DE  
JABUTICABA (*Plinia* sp.)**

**LAVRAS – MG**

**2023**

**GABRIEL PEDROSO DE LIMA ALEXANDRE**

**AVALIAÇÃO DO USO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHO NA SECAGEM EM  
CAMADA DE ESPUMA DA POLPA DE JABUTICABA (*Plinia sp.*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, área de concentração em Engenharia de Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Bruna de Souza Nascimento

Orientadora

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél

Coorientadora

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Alexandre, Gabriel Pedroso de Lima.

Avaliação do uso da radiação infravermelho na secagem em  
camada de espuma da polpa de jabuticaba (*Plinia* sp.) / Gabriel  
Pedroso de Lima Alexandre. - 2023.

106 p. : il.

Orientador(a): Bruna de Souza Nascimento.

Coorientador(a): Lidja Dahiane Menezes Santos Borél,  
Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Espuma. 2. Infravermelho. 3. Secagem. I. Nascimento, Bruna  
de Souza. II. Borél, Lidja Dahiane Menezes Santos. III. Corrêa,  
Jefferson Luiz Gomes. IV. Título.

**GABRIEL PEDROSO DE LIMA ALEXANDRE**

**AVALIAÇÃO DO USO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHO NA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA POLPA DE JABUTICABA (*Plinia* sp.)**

**EVALUATION OF THE USE OF THE INFRARED RADIATION ON THE FOAM-MAT DRYING OF JABUTICABA PULP (*Plinia* sp.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, área de concentração em Engenharia de Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de novembro de 2022.

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa UFLA

Prof. Dr. Hugo Perazzini UNIFEI

---

Profa. Dra. Bruna de Souza Nascimento  
Orientadora

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél  
Coorientadora

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2023**

*Para os meus pais, Nilce e Jair, a minha tia  
Neusa, a Misty, a Amanda Gomes e a Juliana  
Carmo.*

*Vocês me apoiaram e me deram o suporte  
necessário para que eu concluísse este  
trabalho.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial o Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), pela oportunidade de realizar este trabalho.

Agradeço à indústria ASA – Aviário Santo Antônio LTDA – pela doação da albumina de ovo.

Agradeço à minha professora e orientadora Bruna de S. Nascimento: obrigado por acreditar em mim e em nosso trabalho. Você foi essencial para o meu crescimento acadêmico e desenvolvido do nosso projeto. Você é uma jardineira extraordinária. Cultivaremos muitos outros jardins juntos.

À minha coorientadora Lidja D. M. S. Borél: obrigado por todo conhecimento compartilhado comigo. Eu não teria conseguido terminar este projeto sem você.

Ao meu coorientador Jefferson L. G. Corrêa: obrigado pelos ensinamentos e empréstimo do laboratório para a condução do nosso trabalho.

Agradeço à banca examinadora pelo interesse e disponibilidade.

Sou extremamente grato a Juliana R. do Carmo pela dedicação, ajuda, ensinamentos, conhecimentos e momentos de alegria compartilhados.

À prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Renata Lima-Corrêa: obrigado pelo empréstimo do anemômetro.

Aos técnicos Felipe, Lucas e Shirley: obrigado pela disponibilidade em ajudar.

Minha gratidão a Gabriela Ribeiro – da iniciação científica – pela ajuda prestada.

À técnica Creusa Pedroso: obrigado pelos suportes, ajudas, ensinamentos e risadas.

Para Alexandre, Gustavo, Syara e Xicó: tive sorte de morar com pessoas legais, mente aberta, respeitosas, boas de papo e que não dispensavam uma cerveja.

Muito obrigado!

## EPÍGRAFE

*"nem tudo é questão de tempo  
tem coisa que é questão  
de temperatura."*

*(Liana Ferraz)*

## RESUMO GERAL

A jabuticaba é uma fruta nativa do Brasil a qual é apreciada pelo seu sabor, gosto doce e ligeiramente ácido. A jabuticaba fresca apresenta elevada perecibilidade que implica baixa vida útil. Deste modo, aplica-se a secagem para diminuir a umidade, resultando em aumento da vida útil e possibilitando a oferta em períodos entressafas de produtos derivados da jabuticaba. A técnica de secagem em camada de espuma (SCE) tem sido aplicada a diversos alimentos. No presente estudo, a SCE foi proposta para secar polpa de jabuticaba (PJ) na forma de espuma aplicando o ar aquecido (AQ), como um tipo de secagem, e a radiação infravermelho (IV) como outra. O objetivo foi avaliar a cinética de secagem de ambas as secagens, como os efeitos ocasionados às propriedades físicas e no teor de antocianinas totais (Ant) dos pós de polpa de jabuticaba (SJ) obtidos. Os parâmetros avaliados foram a temperatura (T) (50; 60; e 70 °C), a velocidade (v) (0,5; 1,0; e 1,5 m s<sup>-1</sup>) do ar aquecido para a SCE AQ, e a potência radiação IV (90; 130; e 170 W) e a velocidade do ar (0,5; 1,0; e 1,5 m s<sup>-1</sup>) para a SCE IV. A metodologia de superfície de resposta foi empregada para avaliar as condições em relação à temperatura de superfície (T<sub>s</sub>), ao tempo de secagem (ts), à atividade de água (a<sub>w</sub>), ao conteúdo de Ant e à difusividade efetiva (D<sub>ef</sub>). ts menores foram obtidos utilizando elevadas temperaturas e baixas velocidades no caso da SCE AQ, e elevadas potências da radiação IV e baixas velocidades para a SCE IV. O modelo de Page foi o que melhor se ajustou para ambos os métodos secagem. A taxa de secagem foi maior para a SCE IV em relação à SCE AQ. Observou-se somente o período de taxa decrescente para ambos os métodos de secagem. O aumento simultâneo da T e v ocasionou aumento do ts. A a<sub>w</sub> foi reduzida ao elevar a T e diminuir a v. Elevar a T favoreceu a degradação do conteúdo das antocianinas, enquanto aumentar a v ocasionou menor degradação. A D<sub>ef</sub> foi aumentada ao elevar a T de 50 para 70 °C. Para a SCE IV, observou-se que elevar a potência IV ocasionou redução do ts e favoreceu a degradação do conteúdo das Ant, enquanto a a<sub>w</sub> a D<sub>ef</sub> aumentaram. O aumento da v acarretou aumento do ts, a<sub>w</sub>, não favoreceu a degradação das Ant, porém diminuiu a D<sub>ef</sub>. A desejabilidade global foi de 0,712 0,614 para SCE AQ e SCE IV, respectivamente. O SJ obtido pela SCE AQ apresentou maior densidade *bulk*, *tapped* e diferença total de cor (p ≤ 0,05) em relação ao SJ obtido pela SCE IV que, por sua vez, apresentou maior densidade de partícula (p ≤ 0,05). Ambos os métodos de secagens conferiam elevada porosidade ao SJ, fluidez e coesividade razoáveis, índice de escurecimento acima de 90% e índice de brancura aproximadamente 21%.

**Palavras-chave:** Albumina de ovo. Superfície de resposta. Taxa de secagem. Tempo de secagem. Antocianinas.

## ABSTRACT

Jaboticaba is a fruit native to Brazil which is appreciated for its flavor, sweetness and slightly acidic taste. Fresh jaboticaba presents is highly perishable which implies a low shelf life. This way, drying is applied to reduce moisture, resulting in an increase in shelf life and enabling the off-season offer of periods of products derived from jaboticaba. The foam-mat drying (SCE) technique has been applied to various foods. In the present study, the SCE was proposed to dry jaboticaba pulp (PJ) in the form of foam by applying heated air (AQ), as one type of drying, and infrared radiation (IV) as another. The objective was to evaluate the drying kinetics of both drying processes, as well as the effects on the physical properties and on the total anthocyanins (Ant) content of the jaboticaba pulp powder (SJ) obtained. The parameters evaluated were temperature (T) (50; 60; and 70 °C), velocity (v) (0.5; 1.0; and 1.5 m s<sup>-1</sup>) for SCE AQ, and IV radiation power (90; 130; and 170 W) and air velocity (0.5; 1.0; and 1.5 m s<sup>-1</sup>) for SCE IV. The response surface methodology was used to evaluate the conditions in relation to drying time (ts), water activity (aw), Ant content and effective diffusivity (Def). Smaller ts were obtained using high temperatures and low velocities in the case of SCE AQ, and high powers of IV radiation and low velocities for SCE IV. Page's model was the best fit for both drying methods. The drying rate was higher for SCE IV compared to SCE AQ. There observed only the falling rate period for both drying methods. The simultaneous increase on T and v caused an increase in ts. The aw was reduced by raising T and lowering v. Elevating T favored the degradation of the anthocyanins content, while increasing T caused less degradation. Def was increased by raising T from 50 to 70 °C. For SCE IV, it was observed that increasing IV power caused a reduction in ts and favored the degradation of Ant content, while aw and Def increased. The increase of v led to an increase in ts, aw, which did not favor Ant degradation, but decreased Def. The overall desirability was 0,712 and 0,614 for SCE AQ and SCE IV, respectively. The SJ obtained by SCE AQ showed higher bulk density, tapped and total color difference ( $p \leq 0.05$ ) in relation to the SJ obtained by SCE IV which, in turn, showed higher particle density ( $p \leq 0.05$ ). Both drying methods conferred high porosity to the SJ, reasonable fluidity and cohesiveness, browning index above 90% and whiteness index approximately 21%.

**Keywords:** Albumen. Response surface. Drying rate. Drying time. Anthocyanins.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### PRIMEIRA SEÇÃO

Figura 1 — Jabuticabeira.....	24
Figura 2 — Jabuticaba.....	26
Figura 3 — Sistema de espuma 2D generalizado.....	30
Figura 4 — Ilustração generalizada da drenagem de líquido em uma espuma.....	31
Figura 5 — Espectro eletromagnético.....	33
Figura 6 — Lâmpada refletora incandescente de infravermelho.....	34
Figura 7 — Representação geral da interação da radiação IV com um alimento.....	35
Figura 8 — Curvas típicas da secagem.....	38
Figura 9 — Combinações dos tratamentos em um planejamento $3^2$ .....	43
<b>ARTIGO – Avaliação do uso da radiação infravermelho na secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba (<i>Plinia</i> sp.).....</b>	<b>60</b>
Figura 1 – Diagrama do secador.....	68
Figura 2 – (a) polpa da jabuticaba e (b) espuma da polpa de jabuticaba.....	77
Figura 3 – Evolução temporal da remoção da razão de umidade em camada de espuma da polpa de jabuticaba em diferentes temperaturas (50, 60 e 70 °C) a 0,5 m s <sup>-1</sup> e velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m s <sup>-1</sup> ) a 50 °C.....	79
Figura 4 – Evolução temporal da remoção da razão de umidade em camada de espuma da polpa de jabuticaba em diferentes potências (90, 130 e 170 W) e velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m s <sup>-1</sup> ) de secagem.....	80
Figura 5 – Taxas de secagem (a) com ar aquecido e (b) infravermelho.....	83
Figura 6 – Superfícies de resposta com ar aquecido e como resposta (a) a temperatura de superfície da espuma da polpa de jabuticaba (°C), (b) o tempo de secagem (min), (c) atividade de água (–), (d) o conteúdo de antocianinas totais (mg 100 g <sup>-1</sup> ) e (e) a difusividade efetiva (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ).....	84

Figura 7 – Superfícies de resposta com radiação infravermelho e como resposta (a) a temperatura de superfície da espuma da polpa de jabuticaba (°C), (b) o tempo de secagem (min), (c) atividade de água (–), (d) o conteúdo de antocianinas totais (mg 100 g <sup>-1</sup> ) e (e) a difusividade (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) .....	85
Figura 8 – Crosta formada durante a secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba (a) com ar aquecido a 60 °C e 1,0 m s <sup>-1</sup> e (b) radiação infravermelho a 130 W e 1,0 m s <sup>-1</sup> .....	87
Figura 9 – Função desejabilidade para o tempo de secagem e antocianinas totais para a secagem em camada de espuma (a) com ar aquecido e (b) radiação infravermelho .....	91

## LISTA DE TABELAS

### **ARTIGO – Avaliação do uso da radiação infravermelho na secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba (*Plinia sp.*)**

Tabela 1 – Níveis reais e codificados (entre parênteses) da temperatura e velocidade do ar de secagem para cada condição de secagem do método convencional .....	67
Tabela 2 – Níveis reais e codificados (entre parênteses) da potência da radiação IV e velocidade do ar de secagem para cada condição de secagem aplicando IV .....	67
Tabela 3 – Estimativas padrão na escala de desejabilidade .....	69
Tabela 4 – Modelos da cinética de secagem .....	70
Tabela 5 – Classificação da capacidade de escoamento do pó com base no índice de Carr e na razão de Hausner .....	73
Tabela 6 – Caracterização física da polpa e da espuma da polpa de jabuticaba .....	76
Tabela 7 – Resultados estatísticos dos ajustes dos modelos de Newton, Page e Henderson-Pabis para os dados experimentais da secagem com ar aquecido .....	81
Tabela 8 – Resultados estatísticos dos ajustes dos modelos de Newton, Page e Henderson-Pabis para os dados experimentais da secagem com radiação aquecido .....	82
Tabela 9 – Efeitos da temperatura e do ar aquecido em relação à temperatura da superfície da espuma da polpa de jabuticaba e em relação ao tempo de secagem, atividade de água, antocianinas totais e da difusidade efetiva pó de polpa de jabuticaba .....	85
Tabela 10 – Efeitos da potência da radiação infravermelho e velocidade do ar não aquecido em relação à temperatura da superfície da espuma da polpa de jabuticaba e em relação ao tempo de secagem, atividade de água, antocianinas totais e difusidade efetiva do pó de polpa de jabuticaba .....	89
Tabela 11 – Propriedades físicas do pó da polpa de jabuticaba obtido .....	93

## LISTA DE QUADROS

### PRIMEIRA SEÇÃO

Quadro 1 — As nove principais espécies de jabuticaba com seus respectivos nomes populares .....	25
Quadro 2 — Aplicação da secagem em camada de espuma em diversos alimentos sob condições distintas .....	29
Quadro 3 — Aplicação combinada da secagem infravermelho com convecção a ar quente para alguns alimentos sob condições variadas .....	37
Quadro 4 — Modelos matemáticos de secagem em camada delgada.....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS

abs	Absorvida
ali	Alimento
AQ	Ar aquecido
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
c	Número de pontos centrais
e	Espuma
eq	Equilíbrio
exp	Experimental
h	Hora(s)
IV	Infravermelho
min	Minuto(s)
p	Número de fatores
prep	Predito(a)
ref	Refletida
s	Segundo(s)
tr	Transmitida
w	Água

## LISTA DE SIGLAS

Abs	Absorbância
C.C.	Condição de contorno
C.I.	Condição inicial
CEAGESP	Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo
CIEL*a*b*	Comissão Internacional de Iluminantes
EJ	Espuma da polpa de jabuticaba
FD	Fator de diluição
FIR	Infravermelho distante
MIR	Infravermelho médio
MM	Massa molar da cianidina-3-glicosídeo
NIR	Infravermelho próximo
PJ	Polpa da jabuticaba
REQM	Raiz do erro quadrático médio
SCE	Secagem em camada de espuma
SJ	Pó da polpa de jabuticaba

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Absortividade molar [-]
$\varphi$	Porosidade [-]
$\beta_0$	Termo constante ou a média
$\beta_1$	Coefficiente linear do fator $x_1$
$\beta_{11}$	Coefficiente quadrático do fator $x_1$
$\beta_{12}$	Coefficiente da interação entre os fatores $x_1$ e $x_2$
$\beta_2$	Coefficiente linear do fator $x_2$
$\beta_{22}$	Coefficientes quadrático do fator $x_2$
$\beta_i$	Coefficiente linear
$\beta_{ii}$	Coefficiente quadrático
$\beta_{ij}$	Coefficiente da interação
$\epsilon$	Erro ou o ruído observado na resposta $y$
$a$	Coefficiente do modelo de secagem [-]
$a^*$	Verde [-] e vermelho [+] [-]
$a^*_{PJ}$	Verde-vermelho da polpa de jabuticaba [-]
$a^*_{SJ}$	Verde-vermelho do pó da polpa de jabuticaba [-]
$a_w$	Atividade de água [-]
$b^*$	Azul [-] e amarelo [+] [-]
$b^*_{PJ}$	Azul-amarelo da polpa de jabuticaba [-]
$b^*_{SJ}$	Azul-amarelo do pó da polpa de jabuticaba [-]
$c$	Número de pontos centrais [-]
$C^*$	Saturação ou croma [-]
$C_i$	Valor ajustado desejado mais baixo

D	Coeficiente de difusão (difusidade) [ $m s^{-1}$ ]
D(x)	Desejabilidade global [-]
D <sub>ef</sub>	Difusidade efetiva de umidade [ $m s^{-1}$ ]
d <sub>i</sub>	Desejabilidade individual [-]
h°	Tonalidade [-]
IC	Índice de Carr [%]
k	Constante da secagem [ $s^{-1}$ ]
k	Fator ou variável independente [-]
L	Espessura [ $m$ ]
L*	Luminosidade [-]
L* <sub>PJ</sub>	Luminosidade da polpa de jabuticaba [-]
L* <sub>SJ</sub>	Luminosidade do pó da polpa de jabuticaba [-]
m	Massa [ $kg$ ]
m <sub>b.s.</sub>	Massa da matéria seca em base seca [ $kg$ ]
m <sub>w</sub>	Massa de água [ $kg$ ]
N	Número de observações [-]
n	Número de termos da expansão de Taylor [-]
p	Número de fatores [-]
P	Potência da lâmpada emissora de radiação infravermelho [ $W$ ]
r	Número de réplicas [-]
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação [-]
RH	Razão de Hausner [-]
RX	Razão da umidade [-]
RX <sub>exp,i</sub>	i-ésima razão de umidade experimental [-]
RX <sub>prep,i</sub>	i-ésima razão de umidade predita [-]
T	Temperatura do ar [°C]

$T_i$	Valor alvo
$U_i$	Valor ajustado desejado mais alto
$v$	Velocidade do ar [ $m s^{-1}$ ]
$V$	Volume [ $m^3$ ]
$X$	Conteúdo de umidade [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$X_0$	Conteúdo inicial da umidade [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$X_{b.s.}$	Conteúdo de umidade em base seca [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$X_{b.u.}$	Conteúdo de umidade em base úmida [ $kg \text{ água } kg \text{ total}^{-1}$ ]
$X_{eq}$	Conteúdo de umidade de equilíbrio dinâmico [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$x_i$	Fator temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) ou potência da radiação infravermelho [ $W$ ]
$x_j$	Fator velocidade do ar aquecido [ $m s^{-1}$ ] ou velocidade do ar não aquecido (a $25^{\circ}C$ ) [ $m s^{-1}$ ]
$X_t$	Conteúdo de umidade no tempo $t$ da secagem [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$X_{t+\Delta t}$	Conteúdo de umidade no tempo posterior ao tempo $t$ [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$y$	Variável resposta ou variável independente
$Y_i$	Respostas avaliadas
$z$	Número de constantes do modelo de secagem [ $-$ ]
$\Delta E$	Varição total de cor [ $-$ ]
$\Delta t$	Varição do tempo de secagem [ $s$ ]
$\Delta X$	Varição do conteúdo de umidade [ $kg \text{ água } kg \text{ matéria seca}^{-1}$ ]
$\lambda$	Comprimento de onda [ $m$ ]
$\nu$	Frequência de oscilação [ $Hz$ ]
$\rho_{bulk}$	Densidade <i>bulk</i> [ $kg m^{-3}$ ]
$\rho_{EJ}$	Densidade da espuma da polpa de jabuticaba [ $kg m^{-3}$ ]
$\rho_{partícula}$	Densidade de partícula [ $kg m^{-3}$ ]

$\rho_{PJ}$	Densidade da polpa de jabuticaba [ $kg\ m^{-3}$ ]
$\rho_{tapped}$	Densidade <i>tapped</i> [ $kg\ m^{-3}$ ]
$\varphi$	Porosidade [%]
$\chi^2$	Qui-quadrado [—]

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>21</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Jaboticabeira.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Jaboticaba .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Secagem .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Secagem em camada de espuma.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Secagem com radiação infravermelho.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Curvas de secagem .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Representação da cinética de secagem.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Planejamento fatorial 3<sup>k</sup> .....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>
	<b>ARTIGO – Avaliação do uso da radiação infravermelho na secagem em camada de espuma da polpa de jaboticaba (<i>Plinia</i> sp.) .....</b>	<b>60</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>2.1</b>	<b>Matéria-prima .....</b>	<b>65</b>
<b>2.2</b>	<b>Caracterização da polpa de jaboticaba .....</b>	<b>65</b>
<b>2.3</b>	<b>Preparo e caracterização da espuma de polpa de jaboticaba .....</b>	<b>65</b>
<b>2.4</b>	<b>Experimentos de secagem .....</b>	<b>66</b>
<b>2.5</b>	<b>Otimização com a metodologia da desejabilidade .....</b>	<b>68</b>
<b>2.6</b>	<b>Tratamentos dos dados de cinética de secagem .....</b>	<b>70</b>
<b>2.7</b>	<b>Caracterização do produto final .....</b>	<b>71</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Densidade bulk e tapped .....</b>	<b>71</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Densidade de partícula .....</b>	<b>72</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Porosidade .....</b>	<b>72</b>

2.7.4	Capacidade de escoamento .....	73
2.7.5	Medida da cor .....	73
2.7.6	Conteúdo de antocianinas totais .....	74
2.8	Tratamento estatístico .....	75
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	76
3.1	Caracterização da polpa e da espuma de jabuticaba .....	76
3.2	Cinética de secagem da espuma da polpa de jabuticaba: com ar aquecido (método convencional), e aplicação de IV .....	78
3.3	Representação matemática da cinética de secagem em camada delgada .....	80
3.4	Propriedades físicas dos pós da polpa de jabuticaba .....	84
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	96
5	<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	97

**PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO

A jabuticaba (*Plinia* sp.) é uma fruta nativa do Brasil bastante apreciada pelo seu sabor. É uma fruta rica em compostos fenólicos, em especial as antocianinas as quais conferem à casca uma coloração roxa escura (INADA et al., 2021). A associação sensorial e nutricional torna a jabuticaba uma fruta promissora para estudos, os quais geralmente investigam o impacto do processamento nesses aspectos em relação ao produto final obtido.

De modo geral, o processamento da jabuticaba se faz necessário para prolongar sua vida útil, que é curta, em razão da elevada perecibilidade a qual inviabiliza sua comercialização *in natura*. Além disso, favorece seu mercado em períodos entressafras com obtenção de produtos, tais como geleias, compotas, sucos, licores, vinagres e farinha ou pó que pode ser empregado para a elaboração de outros alimentos (INADA et al., 2021; SANTIAGO et al., 2018; WU; LONG; KENNELLY, 2013). No presente estudo, a secagem foi a operação unitária designada para o processamento da jabuticaba a fim de produzir o pó da polpa da jabuticaba (SJ).

A secagem é um modo de conservação de alimentos antigo e amplamente utilizado e estudado. Em linhas gerais, o processo de secagem consiste em transformar um material sólido, semissólido ou líquido com elevada umidade em um material sólido com umidade baixa. Para tanto, na maioria dos casos, emprega-se energia térmica (calor) promovendo a mudança de fase da água presente no material, a qual passa da fase líquida para a fase vapor, e, então, evapora para uma fase gasosa não saturada de umidade (TELIS; MAURO, 2016).

Os métodos de secagem são diversos, e se pode citar: a secagem convectiva (ar aquecido), solar, radiação micro-ondas, radiação infravermelho, a vácuo, de leito fluidizado, *spray drying* e a secagem em camada de espuma (SCE), como também o emprego de duas ou mais técnicas combinadas (LI et al., 2020). Dentre as técnicas de secagens disponíveis, destaca-se aqui a SCE que não requer elevado gasto de capital, apresenta um tempo de secagem menor/rápido o que leva a maior retenção de compostos termossensíveis, viabiliza a secagem de alimentos viscosos e/ou pegajosos, e o produto obtido pela SCE é leve e poroso que garante lhe uma estabilidade maior quando embalado, como também propriedades de reidratação favoráveis (HARDY; JIDEANI, 2017). A aplicação da radiação infravermelho (IV) na secagem está associada a um tempo de secagem curto, eficiência energética melhorada, temperatura uniforme do produto, produtos finais com qualidade superior quando comparado à outras

técnicas, entre outros (SAKARE et al., 2020). Até o momento, nenhum trabalho foi encontrado na literatura que aplica radiação IV no processo de secagem de espuma alimentícia.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba tanto com emprego do ar aquecido, quanto com aplicação da radiação infravermelho, além de determinar as características físicas e o teor de antocianinas totais dos pós da polpa de jabuticaba obtidos nestes processamentos. Para tanto, o trabalho é constituído de duas partes: i) uma Introdução Geral, Referencial Teórico e Considerações Gerais; ii) um artigo elaborado nas normas da revista *Food and Bioprocess Technology: An International Journal* que contém os seguintes tópicos: Introdução, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, e as Conclusões.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Jabuticabeira

A classificação taxonômica da jabuticabeira apresenta divergências na comunidade científica quanto ao gênero. Há dois gêneros associados à identificação da jabuticabeira: *Myrciaria* e *Plinia*. O gênero *Myrciaria* é utilizado há mais tempo do que o gênero *Plinia* que é atualmente empregado para a classificação botânica da jabuticabeira. Assim, para se referir à jabuticabeira, a comunidade científica adotou ambos os termos como sinônimo. (CRUZ et al., 2016).

A jabuticabeira (*Plinia* sp.), Figura 1, é uma árvore frutífera pertencente à família mirtácea (Myrtaceae) e nativa do Brasil. É uma planta que atinge entre 10 e 15 m de altura, com tronco liso, com diâmetro entre 30 e 40 cm, possui folhas entre 6 e 7 cm de comprimento e entre 2 e 3 cm de largura. Caracteriza-se por manter a folhagem durante todo o ano – perenifólia –, requer moderada ou intensa exposição ao Sol – heliófita – e necessita de condições de umidade moderada (mesófito) a ambientes bastante úmidos (higrófito) (LORENZI, 1992). As flores, brancas, crescem em aglomerados no tronco e ramos; os frutos apresentam formato esférico, os quais deram origem ao nome jabuticabeira, derivado do Tupi – *Iapoti'kaba* (fruta botão) (OLIVEIRA et al., 2019; SILVA et al., 2019; TEIXEIRA; DURIGAN; DURIGAN, 2011).

Figura 1 — Jabuticabeira



Fonte: O próprio autor (2022).

Apesar de haver nove espécies botânicas de jabuticabeiras, conforme mostra o Quadro 1, somente duas delas são cultivadas expressivamente, sendo a *Plinia jaboticaba* (Vell.) Berg e a *Plinia cauliflora* (Mart.) Kausel, cujas denominações populares são Sabará e Paulista, respectivamente (SILVA et al., 2019; TEIXEIRA; DURIGAN; DURIGAN, 2011).

Quadro 1 — As nove principais espécies de jabuticaba com seus respectivos nomes populares

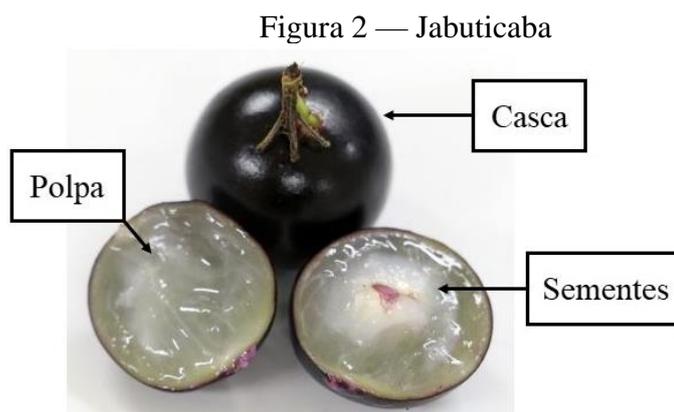
<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>
<i>Myrciaria aureana</i> Mattos	jabuticaba branca
<i>Myrciaria coronata</i> Mattos	jabuticaba coroadada ou jabuticaba de coroa
<i>Myrciaria grandifolia</i> Mattos	jabuticaba graúda
<i>Myrciaria cauliflora</i> (DC.) O. Berg, <i>Myrciaria cauliflora</i> (DC.) Berg, <i>Eugenia cauliflora</i> DC., <i>Myrtus cauliflora</i> Mart., <i>Plinia cauliflora</i> (DC.) Kausel	jabuticaba paulista, jabuticaba ponhema, jabuticaba açu ou jabuticaba híbrida
<i>Myrciaria jaboticaba</i> (Vell.) O. Berg, <i>Myrciaria jaboticaba</i> (Vell.) Berg, <i>Myrtus jaboticaba</i> Vell., <i>Myrcia jaboticaba</i> Baill., <i>Eugenia jaboticaba</i> (Vell.) Kiaersk., <i>Plinia jaboticaba</i> (Vell.) Kausel	jabuticaba sabará ou jabuticaba murta
<i>Myrciaria oblongata</i> Mattos	jabuticaba azeda, jabuticaba ácida
<i>Myrciaria peruviana</i> (Poir.) Mattos var. <i>trunciflora</i> (Berg) Mattos, <i>Myrciaria trunciflora</i> (Berg), <i>Eugenia rubeniana</i> , <i>Plinia trunciflora</i> (O. Berg) Kausel	jabuticaba de cabinho, jabuticaba de penca, jabuticaba café ou jabuticaba preta
<i>Myrciaria phitrantha</i> (Kiaersk.) Mattos, <i>Eugenia phitrantha</i> (Kiaersk.)	jabuticaba costada ou jabuticaba branca vinho
<i>Myrciaria spirito-santensis</i> Mattos	—

Fonte: Adaptado de Mattos (1983) citado por Salomão et al. (p. 237, 2018) e Teixeira, Durigan e Durigan (p. 248, 2011).

No Brasil, as jabuticabeiras são encontradas principalmente na região sudeste e são capazes de florescer duas vezes ao ano (DRAGANO et al., 2013; LEITE et al., 2011). Tem-se a florada principal em meados de agosto a outubro, e a florada secundária, menos intensa, entre os meses de março e junho (OLIVEIRA et al., 2019).

## 2.2 Jabuticaba

A jabuticaba é uma fruta endêmica do Brasil e fruto da jabuticabeira (*Plinia* sp.) ou *Brazilian grape tree* na língua inglesa (WU; LONG; KENNELLY, 2013). A jabuticaba é composta pela casca, polpa e sementes como mostra a Figura 2. Seu estágio de maturação completo leva cerca de 40 a 60 dias, atingindo uma geometria esférica com diâmetro entre 3 e 4 cm e tem casca espessa – denominado epicarpo – com coloração escura variando entre vermelho para roxo escuro e sabor adstringente. A polpa é esbranquiçada, succulenta e doce, podendo conter de uma a quatro sementes as quais são consideradas subprodutos para a agroindústria, uma vez que o principal interesse está na polpa (FIDELIS et al., 2021; INADA et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2013; WU; LONG; KENNELLY, 2013).



Fonte: Adaptado de CEAGESP (2017).

A jabuticaba apresenta potencial para promover benefícios à saúde, mas é pouco conhecida mundialmente. Uma forma de valorizar o seu potencial é por meio dos produtos oriundos do processamento como, por exemplo, o sorvete (BÖGER et al., 2019), geleias (CURI et al., 2018) e o pó (TARONE et al., 2021). O pó pode ser empregado na elaboração de outros alimentos.

As características sensoriais como doçura e acidez resultam da constituição química da polpa que é composta basicamente por uma mistura complexa de elevado conteúdo de açúcares, ácidos orgânicos e terpenos (NERI-NUMA et al., 2018). Além disto, a polpa é rica em carboidratos cuja composição se dá por açúcares simples como a frutose, glicose e sacarose, evidenciando significativo potencial para a produção de suco. O potássio é o mineral mais abundante presente na polpa dessa fruta, além de poder ser considerada como fonte de cobre, ferro, magnésio e vitamina C (INADA et al., 2015). Em relação ao pó obtido da jabuticaba,

costuma-se investigar o conteúdo de antocianinas, os compostos fenólicos e a atividade antioxidante que estão atreladas aos aspectos nutricionais, assim como as densidades *bulk*, *tapped*, de partícula, porosidade, cor, granulometria, higroscopicidade, capacidade de escoamento que estão relacionadas à embalagem, ao transporte, ao acondicionamento e à vida útil, por exemplo, como investigado por Santiago et al. (2018), Inada et al. (2020a) e Fernandes et al. (2020).

No Brasil, a maneira mais habitual de se consumir a jabuticaba é na forma *in natura*, pois reúne os atributos sensoriais necessários para agradar e satisfazer o gosto do brasileiro que é afigurado pela doçura pronunciada e acidez sutil. No entanto, trata-se de uma fruta extremamente perecível quando *in natura*, isto é, com a vida útil (*shelf life*) muito curta, sendo, portanto, necessário o processamento para possibilitar sua comercialização (ALBUQUERQUE et al., 2020; CHANG; ALASALVAR; SHAHIDI, 2018; GERALDI et al., 2020; INADA et al., 2018, 2020b; WU et al., 2012; WU; LONG; KENNELLY, 2013) na forma de geleias, xaropes, licores, vinhos, sorvetes, sucos e pós ou farinhas. Dentre os diversos processamentos que a fruta pode ser submetida, destaca-se aqui a secagem.

### 2.3 Secagem

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas e amplamente empregada para a conservação de alimentos (LLAVATA et al., 2020; RATTI; MUJUMDAR, 2020). Consiste na remoção de umidade do alimento até um nível aceitável a fim de minimizar o crescimento microbiano para estender a vida útil do produto (HARDY; JIDEANI, 2017; HNIN et al., 2019; KHAN et al., 2020). É um processo complexo que envolve simultaneamente os fenômenos de transferência de calor e massa (KARIM; HAWLADER, 2005; SANGAMITHRA et al., 2015).

De maneira geral, o ar aquecido transfere energia na forma de calor suficiente ao alimento até atingir o calor latente de vaporização da água, fazendo com que a água livre no alimento seja evaporada. O meio gasoso, ou meio de secagem, pode ser vapor, ar, gases de combustão, devendo ser insaturado para retirar a umidade que está contida no sólido (alimento) na forma de vapor.

Após a remoção da água, pode-se obter um produto com menor volume decorrente do encolhimento geralmente, o que reflete positivamente nos custos relacionados à embalagem, ao manuseio, bem como ao transporte (KARIM; HAWLADER, 2005; SANGAMITHRA et al.,

2015), além de aumentar a vida útil sem comprometer a qualidade do produto (SILVA et al., 2008); e ainda reduzir custos com refrigeração (GEANKOPLIS, 2003).

Alimentos como frutas são caracterizados pela presença variada de vitaminas e minerais qualificando-os como fontes de vitaminas. Além disto, apresentam compostos responsáveis pela identidade sensorial atribuindo coloração, sabor, gostos, aroma e textura (KARIM; HAWLADER, 2005; LI et al., 2020b; REHAN et al., 2021). Portanto, a aplicação inadequada da secagem a estes produtos leva a mudanças desfavoráveis do ponto de vista do consumidor, tais como a descoloração, o encolhimento excessivo, a oxidação de compostos funcionais, a degradação de nutrientes e das características sensoriais (DEHNAD; JAFARI; AFRASIABI, 2016). Assim, o melhor método de secagem é aquele que preserva o máximo de compostos bioativos ou, ainda, a tecnologia que assimila a constituição química do alimento seco com a composição do alimento *in natura* que o originou (BUSTOS et al., 2018).

Existem diversos métodos de secagem de alimentos, como, por exemplo, a secagem convectiva – natural ou forçada –, *spray-drying*, micro-ondas, a vácuo, liofilização, solar, camada de espuma, infravermelho, ou métodos combinados que empregam dois ou mais métodos de secagem (HARDY; JIDEANI, 2017; NADIAN et al., 2017). Nos próximos tópicos serão destacados os métodos de secagem em camada de espuma a secagem com ar aquecido e a secagem infravermelho, visto que estes foram os métodos usados na condução desta dissertação.

### 2.3.1 Secagem em camada de espuma

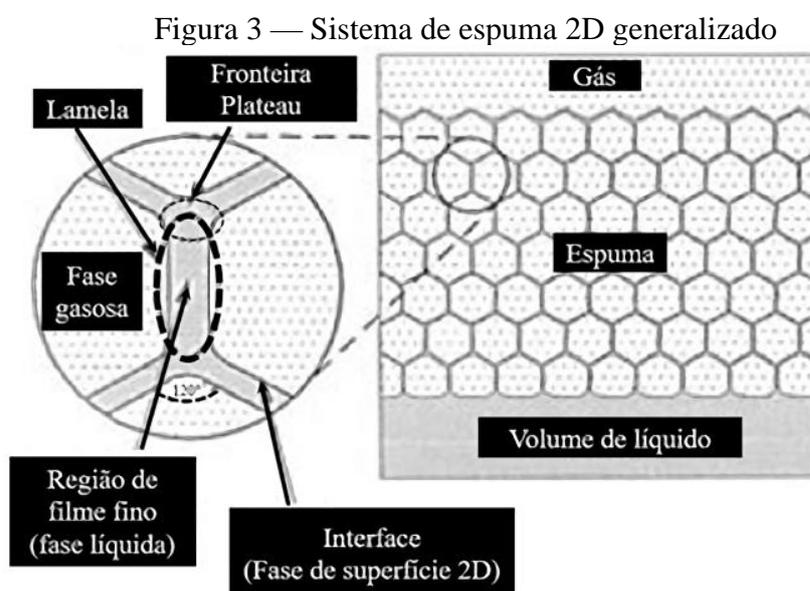
A secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) foi desenvolvida na década de 60 pelo grupo acadêmico de *Western Regional Research Laboratory* (DEHGHANNYA et al., 2019; VAN ARSDEL; COPLEY, 1964). É um processo em que o alimento líquido ou semilíquido é transformado em uma espuma estável pela adição de agente estabilizante e/ou espumante, incorporação de ar ou outro gás inerte por agitação mecânica seguido pela secagem (GALANAKIS, 2012; HARDY; JIDEANI, 2017; RAJKUMAR et al., 2007). Esse método tem sido aplicado para muitos gêneros alimentícios, sendo mais comum sua utilização para alimentos de origem vegetal, sobretudo as frutas, como mostra alguns estudos recentes reunidos no Quadro 2.

Quadro 2 — Aplicação da secagem em camada de espuma em diversos alimentos sob condições distintas

Alimenta	Aditivo		Condições de obtenção da espuma e da secagem	Referência
	espumante	estabilizante		
Cumbeba ( <i>Tacinga inamoena</i> )	Emustab <sup>®</sup> (1,5 g 100 g de polpa <sup>-1</sup> )	Liga Neutra (1,5 g / 100 g de polpa)	15 min de agitação, 0,5; 1,0; e 1,5 mm de espessura, velocidade do ar: 1,0 m s <sup>-1</sup> , temperatura: 50; 60; e 70 °C, convecção forçada	Diógenes et al. (2022)
Cantaloupe ( <i>Cucumis melo</i> L.)	Solução de metilcelulose a 1% (m m <sup>-1</sup> )	Goma arábica (0-15% m/m)	10 min de agitação, 3 mm de espessura, 55 °C, convecção forçada	Li et al. (2021)
Couve ( <i>Brassica oleraceae</i> var. <i>acephala</i> )	Emustab <sup>®</sup> (2,5; 5,0; e 10% m m <sup>-1</sup> )	—	10 min de agitação, 0,5; 1,0; e 1,5 mm de espessura, temperatura: 50; 70; e 90 °C, convecção forçada	Borges, Borél e Lima-Corrêa (2022)
Mango ( <i>Mangifera indica</i> L.)	Albumina de ovo (15%)	Monoestearato de glicerol (3,0%)	2,0; 4,0; e 6,0 mm de espessura, temperatura: 60; 70; e 80 °C, velocidade do ar: 0,44 m s <sup>-1</sup> , convecção forçada	Kumar et al. (2022)
Fruta-do-conde ( <i>Annona squamosa</i> )	Monoestearato de glicerol (0,5%; 1,5%; 2,5%; 3,5%; 4,5%)	Metilcelulose a 0,5%	Agitação: 2; 4; 6; 8; 10 min, temperatura: 50; 60; e 70 °C; espessura: 2; 4; e 6 mm	Deepa e Mohapatra (2020)

Fonte: O próprio autor (2022).

As espumas são compostas por uma fase gasosa dispersa em uma fase líquida contínua (região de filme delgado), as quais são separadas por interface denominada lamela. As lamelas se encontram em um ponto denominado borda de Plateau ou fronteira de Plateau conforme mostra a Figura 3 (EISNER et al., 2007; HARDY; JIDEANI, 2017). Segundo Sangamithra et al. (2015), “a resistência mecânica da lamela determina a estabilidade da espuma juntamente com as propriedades da interface ar-água.”. Do ponto de vista da secagem, a espuma deve permanecer estável durante todo o processo (QADRI; SRIVASTAVA; YOUSUF, 2020).



Fonte: Adaptado de Schramm e Wassmuth (1994, p. 6).

Outro fator importante a ser considerado no processo de secagem em camada de espuma é a densidade da espuma. De acordo com van Arsdel e Copley (1964), “o valor da densidade da espuma a ser submetida a um processo de secagem deve ser de no mínimo  $100 \text{ kg m}^{-3}$  e, no máximo, entre  $500$  e  $600 \text{ kg m}^{-3}$ ”. Muitas vezes é preciso fazer ajustes para se obter espumas com densidades adequadas e isto é feito pela incorporação de ar o qual proporcionará espumas com maiores valores de expansão e menores valores de densidades (SALAH; MOHEBBI; TAGHIZADEH, 2015).

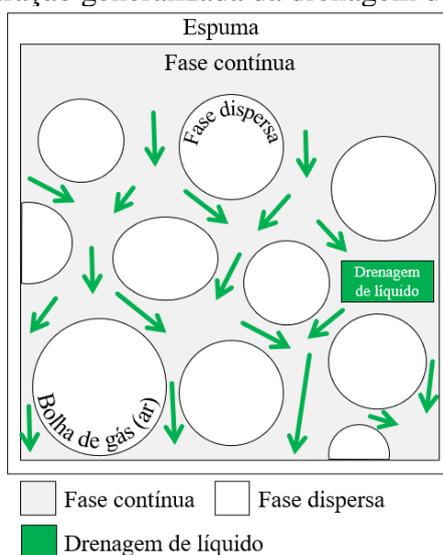
Além disso, a adição de aditivos é indispensável aos alimentos que não apresentam a propriedade de formar espuma ou para aqueles que formam espumas instáveis. Os agentes espumantes facilitam a formação da espuma pela redução da tensão superficial entre dois líquidos ou entre um líquido e um sólido. Um bom agente espumante deve ser capaz de formar um filme resistente, viscoelástico e coeso, implicando em ótima estabilidade térmica e mecânica, além de reduzir a tensão interfacial, ser prontamente adsorvido na interface ar-água

e, por fim, interagir mutuamente com o arranjo de proteínas presentes na interface (SANGAMITHRA et al., 2015). Exemplos de agente espumante são as proteínas – como a albumina –, gomas, gelatina de peixes, alguns emulsificantes como monoestearato de glicerol, monoestearato de propilenoglicol, carboximetilcelulose, troclorofosfato, metilcelulose, entre outros (SANGAMITHRA et al., 2015; VASUDEVAN et al., 2020).

A adição de agentes estabilizantes se faz necessária somente quando a viscosidade da fase contínua é baixa o que acarreta os defeitos de drenagem do líquido (*drainage*) e impermeabilidade do gás da lamela (KLITZING; MÜLLER, 2002). Nota-se nos estudos apresentados no Quadro 2 que a adição de estabilizante é facultativa, pois há estudos que dispensaram o uso.

No contexto alimentício, as proteínas exercem um papel imprescindível na formação e estabilização da fase dispersa da espuma alimentícia (RIO et al., 2014; WALSH; RUSSELL; FITZGERALD, 2008). Termodinamicamente, as espumas são instáveis e, no decorrer do tempo, se desestabilizam por diversos mecanismos, tais como pela drenagem, fusão ou coalescência (*coalescence*) ou pelo engrossamento (*coarsening*) (QADRI; SRIVASTAVA; YOUSUF, 2020; RIO et al., 2014; WALSH; RUSSELL; FITZGERALD, 2008). Uma maneira fácil de determinar a estabilidade da espuma alimentícia é medir o volume de líquido drenado ou coalescido. A drenagem é ocasionada pela ação de forças capilares ou externas como da gravidade (SALAH; MOHEBBI; TAGHIZADEH, 2015). A Figura 4 mostra um esquema genérico da ocorrência de *drainage* em uma espuma alimentícia também generalizada.

Figura 4 — Ilustração generalizada da drenagem de líquido em uma espuma



Fonte: O próprio autor (2022).

Formar espumas aumenta a área de superfície do alimento fluido aumentando, assim, a taxa de secagem, e desenvolve uma estrutura porosa que proporciona qualidade e propriedades instantâneas elevadas ao produto seco (BAG; SRIVASTAV; MISHRA, 2011; QADRI; OSAMA; SRIVASTAVA, 2020). Além disso, propriedades desejáveis como reidratação favorecida, densidade controlada e retenção de compostos voláteis são mantidas, as quais certamente seriam perdidas com a secagem do alimento sem ser na forma de espuma alimentícia (KADAM et al., 2012).

Apesar da simplicidade do método de secagem em camada de espuma, a literatura tem mostrado bons resultados para alimentos fluidos que possuem baixa temperatura de transição vítrea, além de ser devidamente adequado aos gêneros alimentícios que apresentam alto conteúdo de açúcar e são termossensíveis, viscosos e pegajosos, ademais o método tem se destacado como uma tecnologia alternativa ao *spray-drying* (QADRI; SRIVASTAVA; YOUSUF, 2020; SANGAMITHRA et al., 2015). Outra vantagem proeminente dessa tecnologia é o menor custo operacional comparado a outras tecnologias de secagem, visto que o tempo de secagem é reduzido pela grande área superficial de troca de calor (GOMES et al., 2021; HARDY; JIDEANI, 2017; SUN et al., 2020). Embora o elevado aumento na interface líquido-gás favoreça a secagem, a troca de calor por condução é prejudicada pelo grande volume de gás na espuma (HARDY; JIDEANI, 2017). Darniadi, Ho e Murray (2018) observaram que o pó de mirtilo produzido por secagem em camada de espuma assistido por liofilização reteve mais características da polpa de mirtilo em comparação com o pó obtido por *spray drying*. Kanha, Regenstein e Laokuldilok (2020) reportaram que o pó obtido em camada de espuma a 80 °C não apresentou diferença significativa com o pó produzido por *spray drying* para extrato de arroz negro quanto ao conteúdo de antocianinas totais.

### **2.3.2 Secagem com radiação infravermelho**

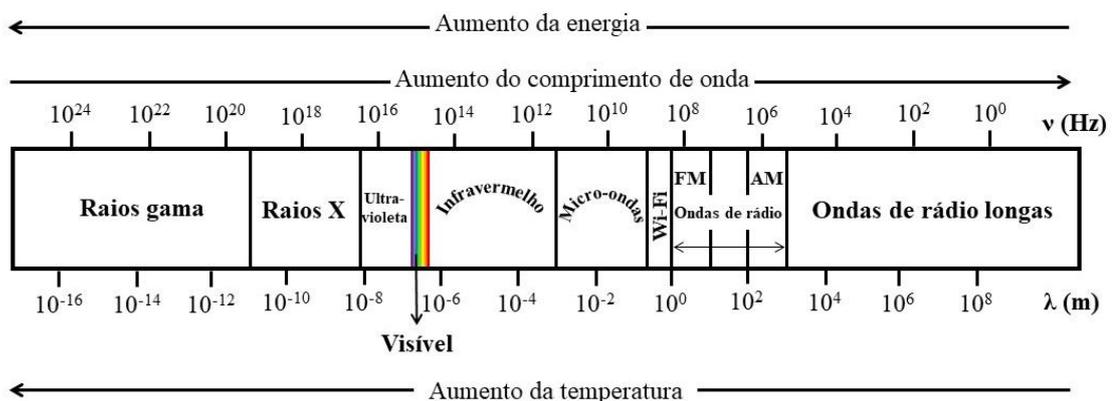
Nos últimos anos, a secagem infravermelho tem se popularizado para a secagem de produtos agrícolas. Comparada com a secagem convencional aplicando ar quente sob as mesmas condições de operação, essa tecnologia possui o tempo de secagem reduzido e taxa de secagem maior devido à alta eficiência térmica, além de não aquecer o ar em torno do material, alterar muito pouco as propriedades sensoriais, os valores nutricionais e preservar os compostos

bioativos do alimento (ADAK; HEYBELI; ERTEKIN, 2017; DOYMAZ, 2018; EL-SEBAII; SHALABY, 2012; KIPCAK et al., 2019; SUI et al., 2014).

Na secagem infravermelho, a energia usada para promover a vaporização da água contida no produto é transferida por meio de radiação eletromagnética, a qual apresenta caráter ondulatório (MARIN; BUSZKA, 2013). Segundo Efremov (2014, p. 318), “a radiação eletromagnética é criada por oscilações nas cargas elétricas (elétrons e íons), e a oscilação da frequência determina o comprimento de onda e o tipo de radiação emitida”.

Na Figura 5, representa-se o espectro eletromagnético, o qual mostra a classificação da radiação eletromagnética com base no comprimento de onda ( $\lambda$ ) e frequência de oscilação ( $\nu$ ). A radiação térmica ( $10^{-7}$ – $10^{-2}$  m) possui a mesma natureza de qualquer outro tipo de radiação eletromagnética, porém com capacidade de aquecer a matéria, compreendendo uma porção da radiação ultravioleta, a banda do visível e do infravermelho (IV).

Figura 5 — Espectro eletromagnético



Fonte: O próprio autor (2022).

Na Figura 5, é possível observar que o aumento de  $\lambda$  e a diminuição de  $\nu$  estão associados à redução da energia radiada, e a diminuição de  $\lambda$  e o aumento de  $\nu$  estão associados ao aumento da energia radiada. Além disso, a temperatura da superfície do emissor também determina o  $\lambda$  da radiação. Assim, ao se tratar de radiação, três parâmetros estão associados a esse fenômeno que são: o  $\lambda$ , a  $\nu$  e a temperatura, compreendidos pelas leis que governantes da radiação: Lei de Planck, Lei de Wien e Lei de Stefan-Boltzmann (RASTOGI, 2021).

A radiação IV é emitida a partir de uma fonte de calor – emissor –, e temperaturas mais elevadas são alcançadas quanto menor for o  $\lambda$  do IV e vice-versa (RASTOGI, 2021). Usualmente, a radiação IV é dividida em três diferentes bandas: infravermelho próximo (NIR do inglês *near-infrared*;  $7,5 \times 10^{-7}$ – $3,0 \times 10^{-6}$  m), infravermelho médio (MIR do inglês *medium*

*infrared*;  $3,0 \times 10^{-6}$ – $25 \times 10^{-6}$  m) e infravermelho distante (FIR do inglês *far infrared*;  $25 \times 10^{-6}$ – $100 \times 10^{-6}$  m) (EFREMOV, 2014; HUANG et al., 2021; SANDU, 1986).

Existem dois tipos de emissores de radiação IV: os emissores a gás e os emissores elétricos. Há inúmeros tipos de emissores elétricos, entre eles, encontram-se os emissores constituídos de um filamento metálico, tubos de quartzo ou cerâmico, os não metálicos, entre outros (EFREMOV, 2014; RASTOGI, 2021). Para os emissores elétricos, a radiação IV é obtida pela passagem da corrente elétrica através de uma resistência o que leva ao aumento da temperatura (RATTI; MUJUMDAR, 2020). A emissividade é uma propriedade do emissor e depende das suas características como a temperatura, do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da direção (ATUNGULU; PAN, 2011).

Na Figura 6, é apresentado um emissor elétrico do tipo lâmpada refletora incandescente de infravermelho. A presença da camada metálica delgada refletora normalmente é de prata polida, pois apresenta uma excelente refletividade da radiação, enquanto as paredes da cabine de secagem são de alumínio polido ou revestidas por esse material, mas com uma refletividade um pouco menor em relação à prata (RATTI; MUJUMDAR, 2020). As lâmpadas incandescentes emitem majoritariamente radiação na banda do infravermelho, sendo ditas como fontes de radiação térmica (TOYODA et al., 2019). Os emissores elétricos possuem muita utilização industrial, são de fácil controle e de rápida taxa de aquecimento (ABOUD et al., 2019).

Figura 6 — Lâmpada refletora incandescente de infravermelho



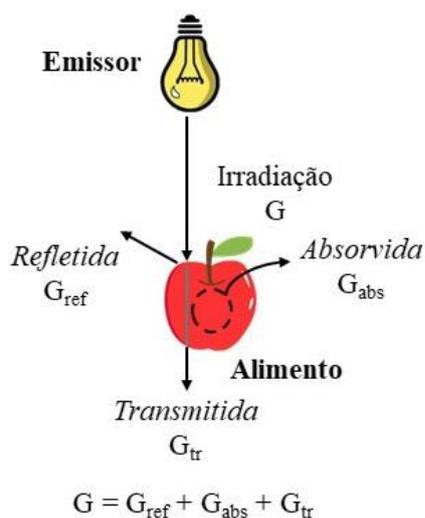
Fonte: OuroLux (2021).

A radiação não requer necessariamente de um meio material para se propagar, por conseguinte, a secagem IV utiliza a energia emitida pelo emissor para o aquecimento direto do material, resultando em maior eficiência térmica (KENT, 2018; ŁECHTAŃSKA; SZADZIŃSKA; KOWALSKI, 2015; SUI et al., 2014b). Em contraste, na secagem por

convecção (ar quente), um meio físico é requerido para que haja a propagação do calor até o material, isto é, o ar de secagem deve ser aquecido e, então, o calor é transferido do ar ao material (ŁECHTAŃSKA; SZADZIŃSKA; KOWALSKI, 2015; SUI et al., 2014b).

A radiação IV emitida pela fonte que incide sobre a superfície do alimento exposto à radiação pode ser absorvida, refletida e/ou transmitida pelo alimento, sendo que somente a fração da radiação absorvida gera aquecimento ao alimento, como ilustrado na Figura 7, devido à mudança no estado vibracional das moléculas (ATUNGULU; PAN, 2011; EFREMOV, 2014; HAMMOUDA; MIHOUBI, 2014; KRISHNAMURTHY et al., 2008).

Figura 7 — Representação geral da interação da radiação IV com um alimento



Fonte: O próprio autor (2022).

A intensidade de absorção da radiação eletromagnética está relacionada inversamente ao comprimento de onda da radiação incidente (ATUNGULU; PAN, 2011). Deste modo, as intensidades de absorção da radiação em diferentes  $\lambda$  diferem de acordo com os componentes do alimento – proteínas, açúcares, lipídios, etc. – com base no grupo químico que cada componente possui (BOREL; MARQUES; PRADO, 2020; KRISHNAMURTHY et al., 2008).

O alimento, quando submetido à secagem pela radiação IV, requer uma baixa refletividade para minimizar a potência elétrica requerida para o aquecimento e uma absorvidade de média a alta. Para alimentos úmidos e delgados, é necessário aumentar a refletividade para evitar um aquecimento extremamente intenso na superfície do alimento que acarreta danos térmicos normalmente associados com baixas temperaturas do emissor, enquanto elevadas temperaturas geram superaquecimento com formação de crosta na superfície do alimento (HUANG et al., 2021).

A transmissividade e a absorvidade são propriedades dependentes do comprimento de onda, conteúdo de umidade e espessura do alimento, visto que o aumento da espessura de um alimento reduz a transmissão da radiação e aumenta a absorção (RATTI; MUJUMDAR, 2020). A profundidade de penetração da radiação é um aspecto muito importante que descreve a atenuação da radiação que atravessa o alimento por causa do efeito combinado da absorção e transmissão. Os fatores que afetam a profundidade de penetração da radiação são a composição química e o estado físico-químico do alimento, ou seja, se o alimento é sólido, líquido, pó, congelado, descongelado, se é uma dispersão, emulsão ou solução etc, e, ainda, pelas propriedades físicas do alimento, como a densidade, porosidade e o conteúdo de umidade (ATUNGULU; PAN, 2011).

Uma das vantagens da radiação IV para desidratar um alimento é aproveitar o fato de que a água absorve expressivamente a radiação térmica na ampla faixa de comprimento de onda entre 1,6 e  $10 \times 10^{-6}$  m, o que facilita a secagem do alimento, como também ocasiona menor tempo de secagem e redução nos custos de energia elétrica (ISIK; OZDEMIR; DOYMAZ, 2019; RASTOGI, 2021; WANG et al., 2019). Alguns estudos apontam que, dentro dessa faixa de  $\lambda$ , a absorção máxima da radiação ocorre entre 2,5 e 3,0  $\mu\text{m}$  (EFREMOV, 2014; KRISHNAMURTHY et al., 2008; PAWAR; PRATAPE, 2017).

Normalmente, a aplicação da secagem IV é referida em termos das 3 bandas: NIR, MIR e FIR. A utilização da secagem IV na região FIR pode ocasionar aquecimento na superfície do material, então é conveniente que o material tenha uma espessura delgada para que a aplicação dessa radiação térmica seja adequada. Já a secagem IV nas regiões NIR e MIR possibilitam o processamento de materiais mais espessos, devido à maior profundidade de penetração da radiação NIR e MIR. A desidratação de frutas geralmente é efetuada aplicando as regiões NIR e MIR (BI et al., 2014; ZHANG et al., 2020).

No Quadro 3, são apresentados alguns estudos que fizeram uso da secagem infravermelho assistida pela convecção a ar quente para alguns gêneros alimentícios em condições operacionais distintas, mostrando produtos desidratados com alta qualidade e/ou condições ótimas para o processo de secagem ser conduzido para o alimento em questão.

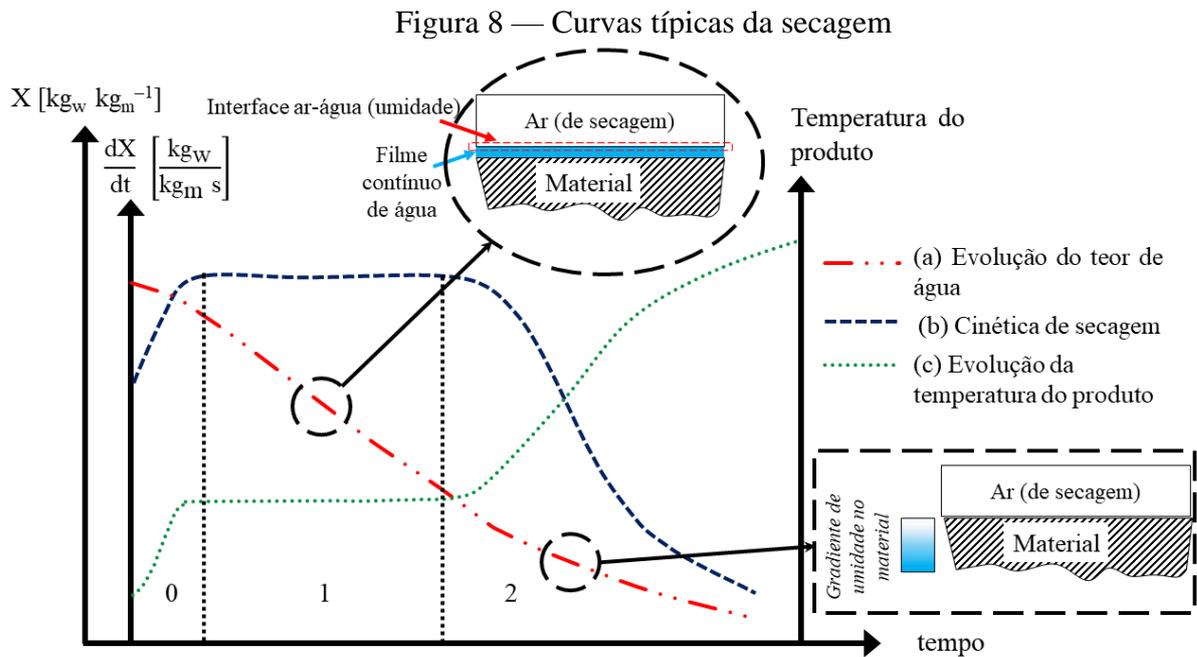
Quadro 3 — Aplicação combinada da secagem infravermelho com convecção a ar quente para alguns alimentos sob condições variadas

<b>Alimento</b>	<b>Condições</b>	<b>Principais resultados</b>	<b>Referência</b>
Cúrcuma ( <i>Curcuma longa</i> L.)	Fatias de 5 e 10 mm; temperaturas de secagem: 50, 60 e 70 °C; velocidade do ar de secagem de 2 m s <sup>-1</sup> ; intensidade do infravermelho 3,02 W cm <sup>-2</sup> .	A secagem híbrida a 70 °C com uma espessura de 5 mm reduziu o tempo de secagem e aumentou a taxa de secagem em relação às secagens isoladas (convecção e infravermelho).	Jeevarathinam et al. (2021)
<i>Kiwi</i> ( <i>Actinidia deliciosa</i> )	6 lâmpadas de 500 W; temperatura de secagem: 40, 45, 50 e 55 °C; velocidade do ar 0,5 m s <sup>-1</sup> .	O tempo de secagem foi reduzido em 51% ao elevar a temperatura de 40 °C para 55 °C.	Özdemir et al. (2017)
Shiitake ( <i>Lentinus edodes</i> )	6 filamentos de quartzo com um pico de comprimento de onda de 2,4-3,0; potência de 400 W; 14 cm de distância dos emissores; temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 1,0 m s <sup>-1</sup> .	O produto apresentou o melhor atributo de cor e maior retenção de nutrientes. A aplicação isolada do infravermelho garantiu o menor encolhimento.	Wang, Zhang e Mujumdar (2014)
Amora ( <i>Morus</i> sp.)	Temperatura do ar: 40–70 °C; velocidade do ar: 0,4–1,6 m s <sup>-1</sup> ; potência do emissor: 500–1500 W.	A condições ótima para otimização do processo de secagem foi a 70 °C, a uma velocidade do ar de 0,4 m s <sup>-1</sup> com uma potência de 1464,57 W.	Golpour et al. (2020)

Fonte: O próprio autor (2022).

### 2.3.3 Curvas de secagem

As curvas de secagem fornecem informações importantes sobre o processo de transferência de calor e massa entre o produto e o agente secagem, geralmente o ar. Na Figura 8, tem-se a representação das curvas típicas do processo de secagem em que: (a) representa a redução da umidade (b.s.) ao longo do tempo de secagem (t); (b) representa taxa de secagem da umidade ao longo de t, a qual é obtida pela diferenciação da curva (a); e (c) representa a variação da temperatura do material ao longo de t.



Fonte: Adaptado de Park et al. (2014, p. 96).

Da Figura 8, observa-se que existem três diferentes períodos de secagem. O período 0 representa o início da secagem em que há o aumento gradual da temperatura do material e da pressão de vapor com sutil perda de umidade acompanhados pelo aumento da velocidade de secagem de modo que a transferência de calor contrabalanceie a transferência de massa (PARK et al., 2014). No período 1 ou período de secagem a taxa constante, a superfície do material contém umidade livre e há um filme contínuo de umidade (água) por toda a superfície do material. Nesse período, a difusão ocorre na interface ar-umidade, isto é, entre o filme contínuo

de umidade e o ar (de secagem) (GEANKOPLIS; HERSEL; LEPEK, 2018; MUJUMDAR, 2014). De acordo com Geankoplis, Hersel e Lepek (2018, p. 1560), “esse período existe somente enquanto a água for fornecida à superfície tão rapidamente quanto é evaporada para que o filme contínuo exista”. Em outras palavras, o período de secagem a taxa constante é caracterizado pela difusão compensar a evaporação da água. Quando o filme contínuo deixa de existir na superfície do material, a difusão se torna o mecanismo governante do movimento da umidade do interior do material para a sua superfície (MUJUMDAR, 2014). Quanto à temperatura do material, esta é normalmente igual à temperatura do bulbo úmido do ar de secagem (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2015; PARK et al., 2014). A transição entre o período 1 e 2 é caracterizado pelo conteúdo crítico de água.

O período 2 ou período de taxa decrescente é evidenciado pela redução da velocidade de secagem (PARK et al., 2014). No período de secagem a taxa decrescente, a superfície do material encontra-se insaturada de umidade, ou seja, não há umidade suficiente para manter o filme contínuo de água (GEANKOPLIS; HERSEL; LEPEK, 2018). Assim, a difusão torna-se o mecanismo governante para a movimentação de umidade dentro do material em razão do gradiente de umidade formado entre a superfície do material (totalmente) seca e o seu interior (GEANKOPLIS; HERSEL; LEPEK, 2018; MUJUMDAR, 2014). Outro ponto relevante do período de secagem a taxa decrescente é o controle limitante exercido ou pelas resistências externa e interna combinadas com resistência interna se sobressaindo sobre a resistência externa, ou somente pelas resistências internas, ou seja, pela movimentação interna de umidade (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2015; PARK et al., 2014). Dois ou mais períodos de secagem a taxa decrescente podem existir tratando-se de materiais higroscópicos (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2015). O final desse período é denotado pelo ponto de equilíbrio, ( $X = X_{eq}$ ), entre o produto e o ar de secagem, em que a velocidade de secagem é nula (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2015; PARK et al., 2014).

#### **2.3.4 Representação da cinética de secagem**

O processo de secagem pode ser representado matematicamente por meio de modelos teóricos, semiempíricos e empíricos (MÜHLBAUER; MÜLLER, 2020a, b).

Os modelos teóricos são fundamentados na segunda lei de Fick da difusão expressa pela equação (1) sob a forma geral:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 DX \quad (1)$$

em que: X é o conteúdo de umidade, t é tempo de secagem, e D é o coeficiente de difusão (difusidade), além de que as propriedades são constantes. A equação (1) é reduzida à equação (2):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2)$$

ao considerar que a transferência de massa (umidade) seja unidimensional na direção z, e que a difusidade efetiva de umidade ( $D_{ef}$ ) seja constante.

A solução analítica para a equação (2) foi proposta por Crank (1975) com hipóteses simplificadoras, tais como: (i) placa plana fina (sistema de coordenadas cartesianas), uma vez que o diâmetro é muito maior do que a espessura (diâmetro ( $10 \times 10^{-2}$  m)/espessura ( $9 \times 10^{-3}$  m)  $\approx$  11); (ii) sem encolhimento; (iii) distribuição do conteúdo de umidade inicial uniforme; (iv) resistência à transferência de umidade na superfície desprezível quando comparada à resistência interna da amostra e (v) taxa de secagem pelas laterais da placa é desprezível (GONÇALVES; FIGUEIREDO, 2017; KHAWAS et al., 2015; LIU; CHEN; HOU, 2012). As duas condições de contorno (C.C.) e a condição inicial (C.I.) são dadas equações (3), (4) e (5), respectivamente:

**C.C. 1:** A superfície da espuma alcança a umidade de equilíbrio dinâmico ( $X_{eq}$ ) (para  $t > 0$ ):

$$X(z, t)|_{z=L} = X_{eq} \quad (3)$$

**C.C. 2:** A C.C. 2, aplicada na superfície inferior da bandeja, ( $z = 0$ ), indica que não há troca de massa dessa região para baixo, isto é, a superfície inferior é impermeável, tendo em vista que a espuma formada foi acomodada em uma bandeja de alumínio. Assim, a difusão de umidade ocorreu a partir de  $z = 0$  em direção à superfície em  $z = L$  (para  $t > 0$ ):

$$\left. \frac{\partial X(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (4)$$

**C.I.:** A distribuição de umidade na espuma é inicialmente uniforme (para  $t = 0$ ,  $0 \leq z \leq L$ ):

$$X(z, t)|_{t=0} = X_0 \quad (5)$$

Assim, a partir das condições iniciais e de contorno e com as hipóteses formuladas anteriormente, a solução analítica da equação (2) segundo o trabalho de Crank (1975) é expressa pela equação (6):

$$RX = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} e^{\left(-\frac{(2n + 1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{L^2}\right)} \quad (6)$$

em que:  $RX$  é a razão de umidade (—) definida pela equação (6),  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  que é o número de termos levados em consideração,  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva de umidade ( $m^2 s^{-1}$ ),  $L$  é a espessura da amostra (m), e  $t$  é o tempo de secagem (s).

A  $RX$  é expressa pela equação (7):

$$RX = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (7)$$

em que:  $X_t$  é o conteúdo de umidade da amostra no instante  $t$ ,  $X_{eq}$  é o conteúdo de umidade de equilíbrio e  $X_0$  é o conteúdo de umidade inicial da amostra; todos os termos são expressos em base seca (FRANCO et al., 2015).

Os modelos teóricos fornecem uma boa descrição e entendimento do fenômeno de transferência de massa durante o processo de secagem, principalmente no período de secagem a taxa decrescente (MÜHLBAUER; MÜLLER, 2020; SADEGHI; MOVAGHARNEJAD; ASL, 2019).

Os modelos semiempíricos são derivados da segunda lei de Fick ou da lei de resfriamento de Newton e são válidos somente dentro da faixa experimental de temperatura,

umidade relativa, velocidade do ar e conteúdo de umidade (MÜHLBAUER; MÜLLER, 2020; SADEGHI; MOVAGHARNEJAD; ASL, 2019). Os modelos são ajustados aos dados experimentais utilizando os modelos clássicos como mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 — Modelos matemáticos de secagem em camada delgada

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>	<b>Referência</b>
Lewis ou Newton	$RX = e^{-kt}$	Bruce (1985)
Page	$RX = e^{-kt^n}$	Page (1949)
Henderson e Pabis	$RX = ae^{-kt}$	Henderson e Pabis (1961)

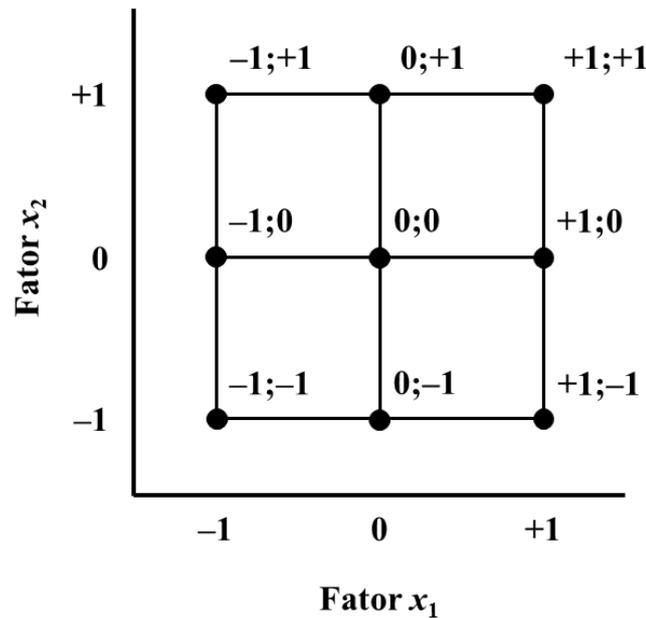
Nota: a (–), k (s<sup>-1</sup>) e n (–) são coeficientes do modelo de secagem, t (s) é o tempo de secagem  
 Fonte: O próprio autor (2022).

Os modelos clássicos de Lewis, Page e Henderson e Pabis são modelos semiempíricos que fornecem bom entendimento de processos de transporte durante o processo de secagem. No entanto, a precisão é considerada insuficiente devido às várias simplificações exigidas (MÜHLBAUER; MÜLLER, 2020). Furtado et al. (2019) avaliaram que os modelos de Lewis e de Henderson e Pabis descrevem adequadamente a secagem da polpa de jaboticaba a 50 °C e 60 °C por convecção forçada.

Empregam-se, comumente, três critérios estatísticos para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos propostos aos dados experimentais da cinética de secagem. O primeiro critério é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e, posteriormente, os valores do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e da raiz do erro quadrático médio (REQM). Valores de  $R^2 > 0,85$ ,  $\chi^2 \ll 0,1$  e  $REQM \ll 0,1$ , são considerados como satisfatórios para a seleção do modelo de ajuste da cinética de secagem (PUENTE-DÍAZ et al., 2020).

### 2.3.5 Planejamento fatorial $3^k$

O planejamento fatorial  $3^k$  mais simples é o  $3^2$ , que possui dois fatores (variáveis independentes), cada fator (k) avaliado em três níveis: baixo (–1), intermediário (0) e alto (+1) (MONTGOMERY, 2017). A Figura 9 mostra todas as combinações entre os tratamentos em um planejamento  $3^2$ .

Figura 9 — Combinações dos tratamentos em um planejamento  $3^2$ 

Fonte: O próprio autor (2022).

Há nove combinações de tratamentos com um planejamento de  $3^2$  sem réplicas (no ponto central) que leva a oito graus de liberdade entre essas combinações dos tratamentos; há dois graus de liberdade para os efeitos de  $x_1$ , igualmente para  $x_2$ ; e quatro graus de liberdade para a interação  $x_1x_2$ . Para  $r$  réplicas, há um total de graus de liberdade dados por  $r \cdot 3^2 - 1$ ; e para o erro,  $3^2(r-1)$  (MONTGOMERY, 2017). Cabe ressaltar que qualquer experimento está suscetível a erros, logo é possível haver a presença de dois erros: o erro aleatório que é associado às medidas e muda de um experimento para outro de uma maneira imprevisível as réplicas minimizam esse tipo de erro; e o erro sistemático o qual tende a permanecer constante ou se apresenta como uma variação padronizada de um tratamento para outro, afetando a resposta. Enquanto o erro aleatório pode ser apenas minimizado, o erro sistemático deve ser eliminado, pois trata-se de uma variação indesejável em virtude de um fator que deveria estar sendo controlado, mas não está (LAWSON, 2015).

O modelo de regressão (equação) que relaciona a variável resposta ou variável dependente,  $y$ , com os fatores,  $x_1$  e  $x_2$ , é dado pela equação (8):

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \epsilon \quad (8)$$

em que:  $\beta_0$  é a média,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes lineares,  $\beta_{12}$  é o coeficiente da interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$ ,  $\beta_{11}$  e  $\beta_{22}$  são os coeficientes quadráticos e  $\epsilon$  é o erro ou o ruído observado na resposta  $y$  (MONTGOMERY, 2017).

A partir do planejamento experimental,  $3^2$  neste caso, pode-se ajustar uma superfície de resposta a qual tem como objetivo otimizar a variável resposta, além de permitir, dentro das condições experimentais, modelar, ajustar e analisar o problema em questão que envolve a variável resposta influenciável por fatores (MONTGOMERY, 2017).

Tendo em vista a importância o potencial tecnológico da jabuticaba, cujo processamento pode contribuir para reduzir perdas no pós-colheita, este levantamento bibliográfico evidencia que a combinação de técnicas de secagem como a secagem infravermelho da polpa de jabuticaba em camada de espuma com a convecção forçada pode contribuir para a obtenção de um produto com maior valor agregado, conservando propriedades nutricionais em relação à polpa *in natura* como é descrito no trabalho de Qadri, Srivastava e Yousuf (2020). Além disso, é possível que haja efeito sinérgico nesta combinação para este produto como reportado para outros alimentos com os principais resultados apresentados no Quadro 3. Considerando a escassez de estudos previamente reportados com o uso desta técnica híbrida para produção da polpa de jabuticaba em pó pode-se afirmar que este trabalho suprirá dados relevantes que podem impulsionar o aprimoramento da técnica, bem como o mercado deste fruto.

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Entre as muitas técnicas de secagem que existem, a secagem em camada de espuma mostra-se apropriada para ser empregada em alimentos com compostos termossensíveis e pegajosos como a polpa de jabuticaba. Além da secagem em camada de espuma, tem-se a secagem que emprega a radiação IV, a qual normalmente proporciona ao material biológico um aquecimento uniforme, alta eficiência térmica, taxas de secagens acentuadas bem como a qualidade do produto final pouco alterada em relação ao material *in natura* em comparação à secagem convencional, ou seja, aquela em se aplica ar aquecido. Até o momento da elaboração deste trabalho, não se encontrou na literatura científica trabalhos que aplicassem as técnicas SCE AQ e SCE IV para a polpa de jabuticaba. Desta forma, viu-se nesta lacuna a oportunidade de contribuir por meio da investigação da caracterização física e química do pó da polpa de jabuticaba produzido pela secagem em camada de espuma com ar aquecido e pela secagem em camada de espuma aplicando a radiação infravermelho. Desta proposta, elaborou-se um artigo científico o qual aborda todos os detalhes empregados durante a condução desta pesquisa. O artigo é apresentado a seguir, na seção II, sob as normas da revista *Food and Bioprocess Technology: An International Journal*. Cabe ressaltar que até o momento o artigo não passou por revisão de pares da revista e, portanto, poderá sofrer algum tipo de alteração, caso o corpo editorial julgue necessário.

## REFERÊNCIAS

- ABOUD, S. A.; ALTEMIMI, A. B.; AL-HIIPHY, A. R. S.; LEE, Y. C.; CACCIOLA, F.; YI-CHEN, L.; CACCIOLA, F. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. **Molecules**, [Basel], v. 24, n. 22, 2019. ISSN: 14203049. DOI: 10.3390/molecules24224125.
- ADAK, N.; HEYBELI, N.; ERTEKIN, C. Infrared drying of strawberry. **Food Chemistry**, [Oxon], v. 219, p. 109–116, 2017. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.09.103.
- ALBUQUERQUE, B. R.; PEREIRA, C.; CALHELHA, R. C.; ALVES, M. J.; ABREU, R. M. V.; BARROS, L.; OLIVEIRA, M. B. P. P.; FERREIRA, I. C. F. R. Jaboticaba residues (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) are rich sources of valuable compounds with bioactive properties. **Food Chemistry**, [Oxon], v. 309, p. 125735, 2020. ISSN: 18737072. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125735.
- ARAYA-FARIAS, M.; RATTI, C. Dehydration of foods: general concepts. *Em*: RATTI, C. (org.). **Advances in Food Dehydration**. [Boca Raton]: CRC Press, 2015. p. 2–36.
- ATUNGULU, G. G.; PAN, Z. Infrared radiative properties of food materials. *Em*: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. (org.). **Infrared heating for food and agricultural processing**. 1. ed., Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011. v. 1. p. 19–39.
- BAG, S. K.; SRIVASTAV, P. P.; MISHRA, H. N. Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 4, n. 8, p. 1450–1458, 2011. ISSN: 19355130. DOI: 10.1007/s11947-009-0243-6.
- BI, J.; CHEN, Q.; ZHOU, Y.; LIU, X.; WU, X.; CHEN, R. Optimization of short- and medium-wave infrared drying and quality evaluation of jujube powder. **Food and Bioprocess Technology**, [S. l.], v. 7, n. 8, p. 2375–2387, 2014. ISSN: 19355149. DOI: 10.1007/s11947-013-1245-y.
- BÖGER, B.; LEAL B, A.; LUCCHETTA, L.; PORTO P, E. Use of jaboticaba (*Plinia cauliflora*) skin in the processing of ice creams. **Revista chilena de nutrición**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. 154–159, 2019. ISSN: 0717-7518. DOI: 10.4067/S0717-75182019000200154. Disponível em: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-75182019000200154&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182019000200154&lng=en&nrm=iso&tlng=en). Acesso em: 12 out. 2022.
- BOREL, L. D. M. S.; MARQUES, L. G.; PRADO, M. M. Performance evaluation of an infrared heating-assisted fluidized bed dryer for processing bee-pollen grains. **Chemical**

**Engineering and Processing - Process Intensification**, [Lausanne], v. 155, p. 108044, 2020. ISSN: 02552701. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108044.

BORGES, H. M. A.; BORÉL, L. D. M. S.; LIMA-CORRÊA, R. A. B. Effects of temperature and foam layer thickness on collard greens powder production by foam mat drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, [S. l.], 2022. ISSN: 17454549. DOI: 10.1111/JFPP.16755. Acesso em: 26 jul. 2022.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150°C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 337–348, 1985. ISSN: 00218634. DOI: 10.1016/0021-8634(85)90098-8. Acesso em: 14 maio. 2021.

BUSTOS, M. C.; ROCHA-PARRA, D.; SAMPEDRO, I.; PASCUAL-TERESA, S. De; LEÓN, A. E. The influence of different air-drying conditions on bioactive compounds and antioxidant activity of berries. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [Washington, D.C.], v. 66, n. 11, p. 2714–2723, 2018. ISSN: 15205118. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b05395.

CHANG, S. K.; ALASALVAR, C.; SHAHIDI, F. Critical reviews in food science and nutrition superfruits: phytochemicals, antioxidant efficacies, and health effects-a comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], p. 1549–7852, 2018. ISSN: 1040-8398. DOI: 10.1080/10408398.2017.1422111.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed., Oxford: Oxford University Press, 1975. 424 p. ISBN: 0198533446.

CRUZ, E. S. Da; DANTAS, A. C. V. L.; CARMO, C. D. Do; BASTOS, L. P. Molecular characterization of jaboticaba tree genotypes located in the municipalities of recôncavo of Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 38, n. 3, p. 01–09, 2016. ISSN: 0100-2945. DOI: 10.1590/0100-29452016510.

CURI, P. N.; ALMEIDA, A. B. De; PIO, R.; LIMA, L. C. de O.; NUNES, C. A.; SOUZA, V. R. De. Optimization of native Brazilian fruit jelly through desirability-based mixture design. **Food Science and Technology**, [S. l.], v. 39, n. 2, p. 388–395, 2018. ISSN: 0101-2061. DOI: 10.1590/FST.31817. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/cta/a/JjYGcPC9tTG45YvdchtBfMx/?lang=en>. Acesso em: 12 out. 2022.

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**, [Hoboken], v. 98, n. 5, p. 2002–2010, 2018. DOI: 10.1002/jsfa.8685. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/jsfa.8685>. Acesso em: 27 mar. 2021.

DEEPA, K.; MOHAPATRA, M. Foam-mat drying characteristics of custard apple pulp. **Journal of Food and Nutrition Sciences**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 89, 2020. ISSN: 2330-7285. DOI: 10.11648/j.jfns.20200804.13.

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**, [Issy-les-Moulineaux], v. 135, p. 30–43, 2019. ISSN: 12900729. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023. Acesso em: 13 jan. 2021.

DEHNAD, D.; JAFARI, S. M.; AFRASIABI, M. Influence of drying on functional properties of food biopolymers: from traditional to novel dehydration techniques. **Trends in Food Science and Technology**, [London], v. 57, p. 116–131, 2016. ISSN: 09242244. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.09.002.

DIÓGENES, A. de M. G. et al. Mathematical models to describe the foam mat drying process of cumbeba pulp (*Tacinga inamoena*) and product quality. **Foods 2022, Vol. 11, Page 1751**, [S. l.], v. 11, n. 12, p. 1751, 2022. ISSN: 2304-8158. DOI: 10.3390/FOODS11121751. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/12/1751/htm>. Acesso em: 3 set. 2022.

DOYMAZ, I. Infrared drying of kiwifruit slices. **International Journal of Green Energy**, [Philadelphia], v. 15, n. 11, p. 622–628, 2018. ISSN: 1543-5075. DOI: 10.1080/15435075.2018.1525735.

DRAGANO, N. R. V.; MARQUES, A. Y. C.; CINTRA, D. E. C.; SOLON, C.; MORARI, J.; LEITE-LEGATTI, A. V.; VELLOSO, L. A.; MARÓSTICA-JÚNIOR, M. R. Freeze-dried jaboticaba peel powder improves insulin sensitivity in high-fat-fed mice. **British Journal of Nutrition**, [Cambridge], v. 110, n. 3, p. 447–455, 2013. ISSN: 00071145. DOI: 10.1017/S0007114512005090.

EFREMOV, G. Infrared drying. *Em*: TSOTSAS, E. ;.; MUJUMDAR, A. S. (org.). **Modern Drying Technology: Volume 5: Process Intensification**. [s. l.], v. 5. p. 317–352. ISSN: 0096-5928. DOI: 10.1177/004051754301301206.

EISNER, M. D.; JEELANI, S. A. K.; BERNHARD, L.; WINDHAB, E. J. Stability of foams containing proteins, fat particles and nonionic surfactants. **Chemical Engineering Science**, [Oxford], v. 62, n. 7, p. 1974–1987, 2007. ISSN: 00092509. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.056.

EL-SEBAILI, A. A.; SHALABY, S. M. Solar drying of agricultural products: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [Oxford], v. 16, n. 1, p. 37–43, 2012. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.134.

FERNANDES, F. A. N.; FONTELES, Thatyane V.; RODRIGUES, S.; BRITO, E. S. De; TIWARI, B. K. Ultrasound-assisted extraction of anthocyanins and phenolics from jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel: kinetics and mathematical modeling. **Journal of Food Science and Technology**, [S. l.], v. 57, n. 6, p. 2321–2328, 2020. ISSN: 09758402. DOI: 10.1007/S13197-020-04270-3/FIGURES/5. Disponível em: <https://link-springer-com.ez26.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s13197-020-04270-3>. Acesso em: 12 out. 2022.

FIDELIS, M. et al. Polyphenols of jaboticaba [*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) O.Berg] seeds incorporated in a yogurt model exert antioxidant activity and modulate gut microbiota of 1,2-dimethylhydrazine-induced colon cancer in rats. **Food Chemistry**, [Oxon], v. 334, p. 127565, 2021. ISSN: 18737072. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127565.

FRANCO, T. S.; PERUSSELLO, C. A.; ELLENDERSEN, L. de S. N.; MASSON, M. L. Foam mat drying of yacon juice: experimental analysis and computer simulation. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 158, p. 48–57, 2015. ISSN: 02608774. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.02.030. Acesso em: 14 jan. 2021.

FURTADO, T. D. R.; MUNIZ, J. Au.; SILVA, E. M.; FERNANDES, J. G. Drying kinetics of jaboticaba pulp by regression models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 41, n. 1, p. e-097, 2019. ISSN: 01002945. DOI: 10.1590/0100-29452019097.

GALANAKIS, C. M. Recovery of high added-value components from food wastes: conventional, emerging technologies and commercialized applications. **Trends in Food Science and Technology**, [London], v. 26, n. 2, p. 68–87, 2012. ISSN: 09242244. DOI: 10.1016/j.tifs.2012.03.003.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles** . 4. ed., [s.l.] : Pearson, 2003.

GEANKOPLIS, C. J.; HERSEL, A. A.; LEPEK, D. H. Drying. *Em*: GEANKOLIS, C. J.; HERSEL, A. A.; LEPEK, D. H. (org.). **Transport processes and separation process principles**. 5. ed., [s.l.] : Pearson, 2018. p. 1532–1634.

GERALDI, M. V. et al. Influence of high isostatic pressure and thermal pasteurization on chemical composition, color, antioxidant properties and sensory evaluation of jaboticaba juice. **LWT**, [Switzerland], p. 110548, 2020. ISSN: 00236438. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110548.

GOLPOUR, I.; KAVEH, M.; CHAYJAN, R. A.; GUINÉ, R. P. F. Optimization of infrared-convective drying of white mulberry fruit using response surface methodology and development of a predictive model through artificial neural network. **International Journal**

of **Fruit Science**, [Philadelphia], v. 20, n. 2, p. 1–21, 2020. ISSN: 15538621. DOI: 10.1080/15538362.2020.1774474.

GOMES, J. V. P. et al. Comparison of bioactive compounds and nutrient contents in whey protein concentrate admixture of turmeric extract produced by spray drying and foam mat drying. **Food Chemistry**, [Oxon], v. 345, p. 128772, 2021. ISSN: 18737072. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128772.

GONÇALVES, B. J. A.; FIGUEIREDO, K. C. de S. Drying experiment for the teaching of simultaneous mass and heat transfer. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, MG, v. 3, n. 3, p. 320–330, 2017. ISSN: 2527-1075. DOI: 10.18540/jcecvl3iss3pp320-330.

HAMMOUDA, I.; MIHOUBI, D. Comparative numerical study of kaolin clay with three drying methods: convective, convective-microwave and convective infrared modes. **Energy Conversion and Management**, [Oxford], v. 87, p. 832–839, 2014. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.07.085.

HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. Foam-mat drying technology: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], v. 57, n. 12, p. 2560–2572, 2017. ISSN: 1040-8398. DOI: 10.1080/10408398.2015.1020359. Acesso em: 10 jan. 2021.

HENDERSON, S. M.; S. PABIS. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [s. l.], p. 169–174, 1961. . Acesso em: 14 maio. 2021.

HNIN, K. K.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S.; ZHU, Y.; HNIN, K. K. Emerging food drying technologies with energysaving characteristics: a review. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 37, n. 12, p. 1465–1480, 2019. ISSN: 1532-2300. DOI: 10.1080/07373937.2018.1510417.

HUANG, D.; YANG, P.; TANG, X.; LUO, L.; SUNDEN, B. Application of infrared radiation in the drying of food products. **Trends in Food Science and Technology**, [London], v. 110, p. 765–777, 2021. ISSN: 09242244. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.039.

INADA, K. O. P. et al. Screening of the chemical composition and occurring antioxidants in jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) and jussara (*Euterpe edulis*) fruits and their fractions. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam ], v. 17, p. 422–433, 2015. ISSN: 17564646. DOI: 10.1016/j.jff.2015.06.002.

INADA, K. O. P.; LEITE, I. B.; MARTINS, A. B. z N.; FIALHO, E.; TOMÁS-BARBERÁN, F. A.; PERRONE, D.; MONTEIRO, M. Jaboticaba berry: a comprehensive review on its

polyphenol composition, health effects, metabolism, and the development of food products. **Food Research International**, [S. l.], v. 147, p. 110518, 2021. ISSN: 0963-9969. DOI: 10.1016/J.FOODRES.2021.110518. Acesso em: 14 out. 2022.

INADA, K. O. P.; NUNES, S.; MARTÍNEZ-BLÁZQUEZ, J. A.; TOMÁS-BARBERÁN, F. A.; PERRONE, D.; MONTEIRO, M. Effect of high hydrostatic pressure and drying methods on phenolic compounds profile of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel and seed. **Food Chemistry**, [S. l.], v. 309, p. 125794, 2020 a. ISSN: 0308-8146. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2019.125794. Acesso em: 13 ago. 2022.

INADA, K. O. P.; SILVA, T. B. R.; LOBO, L. A.; DOMINGUES, R. M. C. P.; PERRONE, D.; MONTEIRO, M. Bioaccessibility of phenolic compounds of jaboticaba (*Plinia jaboticaba*) peel and seed after simulated gastrointestinal digestion and gut microbiota fermentation. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 67, n. November 2019, p. 103851, 2020 b. ISSN: 17564646. DOI: 10.1016/j.jff.2020.103851.

INADA, K. O. P.; TORRES, A. G.; PERRONE, D.; MONTEIRO, M. High hydrostatic pressure processing affects the phenolic profile, preserves sensory attributes and ensures microbial quality of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) juice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [Hoboken], v. 98, n. 1, p. 231–239, 2018. ISSN: 00225142. DOI: 10.1002/jsfa.8461.

ISIK, A.; OZDEMIR, M.; DOYMAZ, I. Infrared drying of bee pollen: effects and impacts on food components. **Czech Journal of Food Sciences**, [Prague], v. 37, n. 1, p. 69–74, 2019. ISSN: 18059317. DOI: 10.17221/410/2017-CJFS.

JEEVARATHINAM, G.; PANDISELVAM, R.; PANDIARAJAN, T.; PREETHA, P.; BALAKRISHNAN, M.; THIRUPATHI, V.; KOTHAKOTA, Anjineyulu. Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters. **Lwt**, [S. l.], v. 144, n. February, p. 111258, 2021. ISSN: 00236438. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111258.

KADAM, D. M.; WILSON, R. A.; KAUR, S.; MANISHA. Influence of foam mat drying on quality of tomato powder. **International Journal of Food Properties**, [Philadelphia], v. 15, n. 1, p. 211–220, 2012. ISSN: 1094-2912. DOI: 10.1080/10942911003763701.

KANHA, N.; REGENSTEIN, J. M.; LAOKULDILOK, T. Optimization of process parameters for foam mat drying of black rice bran anthocyanin and comparison with spray- and freeze-dried powders. <https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1080/07373937.2020.1819824>, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 581–594, 2020. ISSN: 15322300. DOI: 10.1080/07373937.2020.1819824. Disponível em: <https://www-tandfonline.ez26.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1080/07373937.2020.1819824>. Acesso em: 13 dez. 2022.

KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 70, n. 1, p. 35–45, 2005. ISSN: 02608774. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.09.010.

KENT, R. Services. *Em*: KENT, R. (org.). **Energy management in plastics processing — strategies, targets, techniques, and tools**. 3. ed., [s.l.] : Elsevier, 2018. p. 105–210. DOI: 10.1016/B978-0-08-102507-9.50004-0.

KHAN, H.; SABLANI, S. S.; JOARDDER, M. U. H.; KARIM, M. A. Application of machine learning-based approach in food drying: opportunities and challenges. **Drying Technology**, [Philadelphia], p. 1–17, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2020.1853152.

KHAWAS, P.; DASH, K. K.; DAS, A. J.; DEKA, S. C. Drying characteristics and assessment of physicochemical and microstructural properties of dried culinary banana slices. **International Journal of Food Engineering**, [Berlin], v. 11, n. 5, p. 667–678, 2015. ISSN: 15563758. DOI: 10.1515/ijfe-2015-0094.

KIPCAK, A. ; S.; DOYMAZ, I.; DERUN, E. M.; MOROYDOR-DERUN, E. Infrared drying kinetics of blue mussels and physical properties. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**, [Serbia], v. 25, n. 1, p. 1–10, 2019. DOI: 10.2298/CICEQ170808014K.

KLITZING, R. V. ;.; MÜLLER, H. J. Film stability control. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, [London], v. 7, n. 1–2, p. 42–49, 2002. ISSN: 13590294. DOI: 10.1016/S1359-0294(02)00005-5.

KRISHNAMURTHY, K.; KHURANA, H. K.; SOOJIN, J.; IRUDAYARAJ, J.; DEMIRCI, A. Infrared heating in food processing: an overview. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, [Hoboken], v. 7, n. 1, p. 2–13, 2008. ISSN: 15414337. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2007.00024.x.

KUMAR, A.; KANDASAMY, P.; CHAKRABORTY, I.; HANGSHING, L. Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. **Biosystems Engineering**, [S. l.], v. 219, p. 85–102, 2022. ISSN: 1537-5110. DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2022.04.026. Acesso em: 8 out. 2022.

LAWSON, J. **Design and analysis of experiments with R**. 1. ed., Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015. 618 p.

ŁECHTAŃSKA, J. M.; SZADZIŃSKA, J.; KOWALSKI, S. J. Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: quality and energy considerations. **Chemical**

**Engineering and Processing: Process Intensification**, [Lausanne], v. 98, p. 155–164, 2015. ISSN: 02552701. DOI: 10.1016/j.cep.2015.10.001.

LEITE, A. V.; MALTA, L. G.; RICCIO, M. F.; EBERLIN, M. N.; PASTORE, G. M.; MARÓSTICA JÚNIOR, M. R. Antioxidant potential of rat plasma by administration of freeze-dried jaboticaba peel (*Myrciaria jaboticaba* Vell Berg). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [Washington, D.C.], v. 59, n. 6, p. 2277–2283, 2011. ISSN: 00218561. DOI: 10.1021/jf103181x.

LI, J.; LI, Z.; WANG, N.; RAGHAVAN, G. S. V.; PEI, Y.; SONG, C.; ZHU, G. Novel sensing technologies during the food drying process. **Food Engineering Reviews** **2020** **12:2**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 121–148, 2020 a. ISSN: 1866-7929. DOI: 10.1007/S12393-020-09215-2. Disponível em: <https://link-springer-com.ez26.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12393-020-09215-2>. Acesso em: 14 out. 2022.

LI, T. S.; SULAIMAN, R.; RUKAYADI, Y.; RAMLI, S. Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe. **Food Hydrocolloids**, [Oxon], v. 116, p. 106492, 2021. ISSN: 0268005X. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106492. Acesso em: 29 mar. 2021.

LI, Y.; YANG, C.; AHMAD, H.; MAHER, M.; FANG, C.; LUO, J. Benefiting others and self: production of vitamins in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, [United Kingdom], p. jipb.13047, 2020 b. ISSN: 1672-9072. DOI: 10.1111/jipb.13047.

LIU, X.; CHEN, J.; HOU, H. Theoretical analysis of water diffusivity estimated by Crank's equation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [Lausanne], v. 55, p. 24–28, 2012. ISSN: 02552701. DOI: 10.1016/j.cep.2012.02.004.

LLAVATA, B.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; SIMAL, S.; CÁRCEL, J. A. Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. **Current Opinion in Food Science**, [Oxon], v. 35, p. 20–26, 2020. ISSN: 22147993. DOI: 10.1016/j.cofs.2019.12.001.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 1. ed., Nova Odessa: Plantarum, 1992. 385 p.

MARIN, N.; BUSZKA, J. Electromagnetic radiation. *Em: Alternate light source imaging — forensic photography techniques*. [s.l.] : Anderson Publishing, Ltd., 2013. p. 1–9. ISBN: 978-1-4557-7762-4. DOI: 10.1016/B978-1-4557-7762-4.00001-8.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed., Hoboken: Wiley & Sons, 2017. 749 p.

MÜHLBAUER, W.; MÜLLER, J. Drying kinetics. *Em*: MÜHLBAUER, W. ;; MÜLLER, J. (org.). **Drying Atlas: Drying Kinetics and Quality of Agricultural Products**. 1. ed., [s. l.]: Woodhead Publishing, 2020. p. 53–61. DOI: 10.1016/b978-0-12-818162-1.00002-x.

MUJUMDAR, A. S. Principles, classification, and selection of dryers. *Em*: MUJUMDAR, A. S. (org.). **Handbook of industrial drying**. 4. ed., Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 3–30.

NADIAN, M. H.; ABBASPOUR-FARD, M. H.; SADRNIA, H.; GOLZARIAN, M. R.; TABASIZADEH, M.; MARTYNENKO, A. Improvement of kiwifruit drying using computer vision system (CVS) and ALM clustering method. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 35, n. 6, p. 709–723, 2017. ISSN: 0737-3937. DOI: 10.1080/07373937.2016.1208665.

NASCIMENTO, T. P. Do; BETTIOL NETO, E. J.; PEREIRA, R. A.; CASTRO, I. A. de; CHAGAS, E. A.; LAJOLO, F. M.; CORDENUNSI, B. R. Effect of thinning on flower and fruit and of edible coatings on postharvest quality of jaboticaba fruit stored at low temperature. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 33, n. 3, p. 424–433, 2013. ISSN: 0101-2061. DOI: 10.1590/S0101-20612013005000071.

NERI-NUMA, I. A.; SANCHO, R. A. S.; PEREIRA, A. P. A.; PASTORE, G. M. Small Brazilian wild fruits: nutrients, bioactive compounds, health-promotion properties and commercial interest. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 103, p. 345–360, 2018. ISSN: 18737145. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.10.053.

OLIVEIRA, G. P.; ANGELOTTI-MENDONÇA, J.; TANAKA, F. A. O.; SILVA, S. R. Da; SCARPARE FILHO, J. A. Origin and development of reproductive buds in jaboticaba cv. Sabará (*Plinia jaboticaba* Vell). **Scientia Horticulturae**, [Amsterdam], v. 249, p. 432–438, 2019. ISSN: 03044238. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.020. Acesso em: 5 jan. 2021.

ÖZDEMİR, M. B.; AKTAŞ, M.; ŞEVIK, S.; KHANLARI, A. Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. **International Journal of Hydrogen Energy**, [Oxford], v. 42, n. 28, p. 18005–18013, 2017. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.012.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer**. 1949. 1–13 f. Purdue University, [ West Lafayette], 1949. Acesso em: 14 maio. 2021.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 93–127, 2014. ISSN: 1517-8595. DOI: 10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127.

PAWAR, S. B.; PRATAPE, V. M. Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials: a review. **Journal of Food Process Engineering**, [Hoboken], v. 40, n. 1, p. e12308, 2017. ISSN: 01458876. DOI: 10.1111/jfpe.12308.

PUENTE-DÍAZ, L.; SPOLMANN, O.; NOCETTI, D.; ZURA-BRAVO, L.; LEMUS-MONDACA, R. Effects of infrared-assisted refractance Window™ drying on the drying kinetics, microstructure, and Color of physalis fruit purée. **Foods**, [Basel], v. 9, n. 3, p. 343–361, 2020. DOI: 10.3390/foods9030343.

QADRI, O. S.; OSAMA, K.; SRIVASTAVA, A. K. Foam mat drying of papaya using microwaves: machine learning modeling. **Journal of Food Process Engineering**, [Hoboken], v. 43, n. 6, 2020. ISSN: 0145-8876. DOI: 10.1111/jfpe.13394. Acesso em: 11 jan. 2021.

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**, [Philadelphia], v. 60, n. 10, p. 1667–1676, 2020. ISSN: 1040-8398. DOI: 10.1080/10408398.2019.1588221. Acesso em: 11 jan. 2021.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. V.; RATTI, C. Foam mat drying of Alphonso mango pulp. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 25, n. 2, p. 357–365, 2007. ISSN: 0737-3937. DOI: 10.1080/07373930601120126.

RASTOGI, N. K. Infrared heating in drying operations. *Em*: KNOERZER, K.; MUTHUKUMARAPPAN, K. (org.). **Innovative food processing technologies**. 1. ed., [s. l.]: Elsevier, 2021. v. 2. p. 456–476. DOI: 10.1016/b978-0-08-100596-5.22671-1.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Infrared drying. *Em*: MUJUMDAR, A. S. (org.). **Handbook of industrial drying**. 2. ed., New York: Taylor & Francis, 2020. v. 1. p. 567–588.

REHAN, I.; GONDAL, M. A.; ALMESSIERE, M. A.; DAKHEEL, R. A.; REHAN, K.; SULTANA, S.; DASTAGEER, M. A. Nutritional and toxic elemental analysis of dry fruits using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). **Saudi Journal of Biological Sciences**, [Amsterdam ], v. 28, n. 1, p. 408–416, 2021. ISSN: 1319562X. DOI: 10.1016/j.sjbs.2020.10.024.

RIO, E.; DRENCKHAN, W.; SALONEN, A.; LANGEVIN, D. Unusually stable liquid foams. **Advances in Colloid and Interface Science**, [Amsterdam], v. 205, p. 74–86, 2014. ISSN: 00018686. DOI: 10.1016/j.cis.2013.10.023.

SADEGHI, E.; MOVAGHARNEJAD, K.; ASL, A. H. Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of pumpkin samples under natural and forced convection. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Hoboken], v. 43, n. 12, p. e14229, 2019. ISSN: 0145-8892. DOI: 10.1111/jfpp.14229.

SAKARE, P.; PRASAD, N.; THOMBARE, N.; SINGH, R.; SHARMA, S. C. Infrared drying of food materials: recent advances. **Food Engineering Reviews**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 381–398, 2020. ISSN: 18667929. DOI: 10.1007/S12393-020-09237-W/FIGURES/9. Disponível em: <https://link-springer-com.ez26.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12393-020-09237-w>. Acesso em: 14 out. 2022.

SALAH, M. R.; MOHEBBI, M.; TAGHIZADEH, M. Foam-mat drying of cantaloupe (*Cucumis melo*): optimization of foaming parameters and investigating drying characteristics. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Hoboken], v. 39, n. 6, p. 1798–1808, 2015. ISSN: 01458892. DOI: 10.1111/jfpp.12414. Acesso em: 14 jan. 2021.

SANDU, C. Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A Process Analysis. **Biotechnology Progress**, [Hoboken], v. 2, n. 3, p. 109–119, 1986. ISSN: 15206033. DOI: 10.1002/btpr.5420020305.

SANGAMITHRA, A.; VENKATACHALAM, S.; JOHN, S. G.; KUPPUSWAMY, K. Foam mat drying of food materials: a review. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Hoboken], v. 39, n. 6, p. 3165–3174, 2015. ISSN: 01458892. DOI: 10.1111/jfpp.12421.

SANTIAGO, M. C. P. de A. et al. Jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) O. Berg) peel powder produced by convective drying process: a rich anthocyanin product. **Fruits**, [S. l.], v. 73, n. 4, p. 201–208, 2018. ISSN: 1625967X. DOI: 10.17660/TH2018/73.4.1. Acesso em: 12 out. 2022.

SCHRAMM, L. L.; WASSMUTH, F. Foams fundamentals and applications in the petroleum industry. *Em*: SCHRAMM, L. L. (org.). **Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry**. [s. l.]: American Chemical Society, 1994. p. 03–45.

SILVA, J. A. A. Da; TEIXEIRA, G. H. de A.; MARTINS, A. B. G.; CITADIN, I.; WAGNER JÚNIOR, A.; DANNER, M. A. Advances in the propagation of jaboticaba tree. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 41, n. 3, p. 01–10, 2019. ISSN: 0100-2945. DOI: 10.1590/0100-29452019024.

SUI, Y.; YANG, J.; YE, Q.; LI, H.; WANG, H. Infrared, convective, and sequential infrared and convective drying of wine grape pomace. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 32, n. 6, p. 686–694, 2014 a. ISSN: 15322300. DOI: 10.1080/07373937.2013.853670.

SUI, Y.; YANG, J.; YE, Q.; LI, H.; WANG, H. Infrared, Convective, and Sequential Infrared and Convective Drying of Wine Grape Pomace. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 32, n. 6, p. 686–694, 2014 b. ISSN: 15322300. DOI: 10.1080/07373937.2013.853670.

SUN, Y.; ZHANG, Y.; XU, W.; ZHENG, X. Analysis of the anthocyanin degradation in blue honeysuckle berry under microwave assisted foam-mat drying. **Foods**, [Basel], v. 9, n. 4, p. 1–17, 2020. ISSN: 23048158. DOI: 10.3390/foods9040397.

TARONE, A. G.; SILVA, E. K.; BARROS, H. D. de F. Q.; CAZARIN, C. B. B.; MARÓSTICA JUNIOR, M. R. High-intensity ultrasound-assisted recovery of anthocyanins from jaboticaba by-products using green solvents: Effects of ultrasound intensity and solvent composition on the extraction of phenolic compounds. **Food Research International**, [S. l.], v. 140, p. 110048, 2021. ISSN: 0963-9969. DOI: 10.1016/J.FOODRES.2020.110048. Acesso em: 12 out. 2022.

TEIXEIRA, G. H. de A.; DURIGAN, M. F. B.; DURIGAN, J. F. Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora* (Mart.) O.Berg. [Myrtaceae]). Em: YAHIA, E. M. (org.). **Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits Cocona to mango**. 1. ed., [Cambridge]: Elsevier, 2011. p. 246–275e. ISBN: 9781845697358. DOI: 10.1533/9780857092885.246.

TELIS, V. R. N.; MAURO, M. A. Desidratação. Em: TADINI, C. C.; TELIS, N. R. N.; MEIRELLES, A. J. de A.; PESSOA FILHO, P. de A. (org.). **Operações unitárias na indústria de alimentos**. 1. ed., [s.l.] : Grupo GEN, 2016. v. 2. p. 77–148.

TOYODA, H.; KIMINO, K.; KAWANO, A.; TAKAHARA, J. Incandescent light bulbs based on a refractory metasurface. **Photonics**, [Basel], v. 6, n. 4, p. 105, 2019. ISSN: 23046732. DOI: 10.3390/photonics6040105.

VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J. **Food dehydration**. 1. ed., Westport: the Avi Publishing Company, 1964. 721 p.

VASUDEVAN, N.; SULAIMAN, R.; CHONG, G. H.; ADZAHAN, N. A.; SHAARI, N. A. Development of foam mat dried soursop powder using Arabic gum and fish gelatin as foaming agent. [s. l.], 2020. ISSN: 2550-2166. DOI: 10.26656/fr.2017.4(S1).S16.

WALSH, D. J.; RUSSELL, K.; FITZGERALD, R. J. Stabilisation of sodium caseinate hydrolysate foams. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 41, n. 1, p. 43–52, 2008. ISSN: 09639969. DOI: 10.1016/j.foodres.2007.09.003.

WANG, H.; KAUR, S.; ELZOUKA, M.; PRASHER, R. A nano-phonic filter for near infrared radiative heater. **Applied Thermal Engineering**, [Oxford], v. 153, p. 221–224, 2019. ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.001.

WANG, H.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). **Drying Technology**, [Philadelphia ], v. 32, n. 15, p. 1791–1802, 2014. ISSN: 15322300. DOI: 10.1080/07373937.2014.947426.

WU, S. B.; DASTMALCHI, K.; LONG, C.; KENNELLY, E. J.; WEST, B.; YORK, N. Metabolite profiling of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) and other dark-colored fruit juices. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [Washington, D.C.], v. 60, p. 7513–7525, 2012. DOI: 10.1021/jf301888y.

WU, S. B.; LONG, C.; KENNELLY, E. J. Phytochemistry and health benefits of jaboticaba, an emerging fruit crop from Brazil. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 54, n. 1, p. 148–159, 2013. ISSN: 09639969. DOI: 10.1016/j.foodres.2013.06.021. Acesso em: 4 jan. 2021.

ZHANG, Y.; ZHU, G.; LI, X.; ZHAO, Y.; LEI, D.; DING, G.; AMBROSE, K.; LIU, Y. Combined medium- and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (*Luffa cylindrical*) slices. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 284, n. 17, 2020. ISSN: 02608774. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110043.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGO**

(Versão preliminar, considerando que o conselho editorial do periódico poderá sugerir alterações para adequá-lo ao seu próprio estilo. O trabalho foi elaborado com base nas normas do periódico “*Food and Bioprocess Technology: An International Journal*”.)

**Avaliação do uso da radiação infravermelho na secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba (*Plinia* sp.)**

Declarações (“*Statements and Declarations*”)

Conflito de interesses (“*Conflict of Interest*”): Os autores declaram não haver conflito de interesse. (“*The authors declare no competing interests.*”)

Financiamento (“*Funding*”): Este trabalho foi financiado por “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)”.

**Gabriel Pedroso de Lima Alexandre**

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil

e-mail: pedroso620@gmail.com

**Gabriela de Fátima Ribeiro**

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil

e-mail: gabrielaribeiro.18@hotmail.com

**Juliana Rodrigues do Carmo**

Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil

e-mail: juliana\_docarmo@yahoo.com.br

**Jefferson Luiz Gomes Corrêa**

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil

e-mail: jefferson@ufla.br

ORCID: 0000-0002-6818-6927

**Lidja Dahiane Menezes Santos Borél**

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia (DEG), Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil

e-mail: lidja.borel@ufla.br

**Bruna de Souza Nascimento**

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil

e-mail: bruna.nascimento@ufla.br

ORCID: 0000-0002-7797-8344

## RESUMO

No presente estudo, a secagem em camada de espuma (SCE) foi proposta para secar polpa de jabuticaba (PJ) na forma de espuma aplicando o ar aquecido (AQ) para um tipo de secagem e a radiação infravermelho (IV) para outra. O objetivo foi avaliar a cinética de secagem de ambas as secagens, como os efeitos ocasionados às propriedades físicas e no teor de antocianinas dos pós de polpa de jabuticaba (SJ) obtidos. Os parâmetros avaliados foram: temperatura (50; 60; e 70 °C), velocidade (0,5; 1,0; e 1,5 m s<sup>-1</sup>) do ar aquecido, para o método convencional, e potência radiação IV (90; 130; e 170 W) e a velocidade do ar (0,5; 1,0; e 1,5 m s<sup>-1</sup>) para o método empregando IV. A metodologia de superfície de resposta foi empregada para avaliar as condições em relação ao tempo de secagem, à atividade de água, ao conteúdo de antocianinas totais e à difusividade efetiva. Tempos de secagem menores foram obtidos utilizando elevadas temperaturas e baixas velocidades no caso da SCE com AQ, e elevadas potências da radiação IV e baixas velocidades para a SCE com IV. O modelo de Page foi o que melhor se ajustou para ambos os métodos secagem. Elevar a temperatura favoreceu a degradação do conteúdo das antocianinas, enquanto aumentar a velocidade ocasionou menor degradação no caso da SCE AQ. Para a SCE IV, observou-se que elevar a potência IV favoreceu a degradação do conteúdo das antocianinas totais. O SJ obtido pela SCE com AQ apresentou maior densidade bulk, tapped e diferença total de cor ( $p \leq 0,05$ ) em relação ao SJ obtido pela SCE com IV, que, por sua vez, apresentou maior densidade de partícula ( $p \leq 0,05$ ). Pela escala da desejabilidade, o SJ obtido pela SCE AQ e SCE IV foi considerado de qualidade boa e satisfatória, respectivamente. Ambos os métodos de secagens conferiam elevada porosidade ao SJ, fluidez e coesividade razoáveis, índice de escurecimento acima de 90% e índice de brancura aproximadamente 21%.

## 1 INTRODUÇÃO

A jabuticaba (*Plinia* sp.) é uma fruta endêmica do Brasil, cuja polpa é macia, esbranquiçada, doce e ligeiramente ácida. Além disso, possui casca roxa e é levemente adstringente quando madura. A jabuticaba é considerada uma excelente fonte de compostos fenólicos, sendo o composto cianidina-3-glicosídeo a principal e a mais abundante antocianina encontrada na jabuticaba (Costa et al., 2013; Fernandes et al., 2020; Lenquiste et al., 2019; Santos et al., 2021). Apesar de seu conteúdo nutricional, a comercialização da jabuticaba *in natura* é restrita pela safra que acontece duas vezes ao ano e em virtude da elevada perecibilidade (umidade: 92,15%, em base úmida). Para contornar as perdas de produção, o processamento da jabuticaba garante a oferta e a disponibilidade dessa fruta no período entressafras, sendo o pó obtido por meio de técnicas de secagem as quais concedem maior estabilidade ao produto (Furtado et al., 2019).

A secagem é uma técnica antiga comumente aplicada para a preservação de alimentos. A secagem consiste em remover a umidade do material pela aplicação de calor. Entre os tipos de secagem, a secagem em camada de espuma (SCE) é um método que consiste em transformar um líquido ou semilíquido em uma espuma estável pela adição de algum agente espumante sob bateção mecânica (Reis et al., 2021). A SCE se mostra adequada para a secagem de alimentos que possuem compostos sensíveis ao calor, elevado conteúdos de açúcar e viscosidade, além de ser uma alternativa econômica e viável para a produção de alimentos em pó quando comparada a outros métodos de secagem (Qadri et al., 2020). Ao transformar o material em espuma, garante-se o aumento da área de superfície, as taxas de transferência de massa e, conseqüentemente, diminui-se o tempo de secagem.

Embora a secagem com ar aquecido seja comum e amplamente utilizada no processamento de alimentos, esta técnica apresenta algumas desvantagens como o tempo de secagem prolongado, deteriorações indesejáveis do produto e baixa eficiência energética (Gong et al., 2020). Para temperaturas do ar de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar a 0,5 m s<sup>-1</sup>, Tan et al. (2022) reportaram que a secagem com ar a 70 °C foi a mais adequada para a secagem de pêssago quanto à eficiência da secagem, cor do fruto e qualidade, porém ocasionou considerável degradação das antocianinas. Assim, existe-se a necessidade de desenvolver novos métodos de secagem a fim de melhorar a qualidade do produto final (Gong et al., 2020).

A secagem por radiação infravermelho (IV) é considerada uma técnica promissora, uma vez que apresenta alta eficiência energética, reduz o tempo de secagem, promove o aquecimento homogêneo do material e o produto final normalmente apresenta boa qualidade (Huang et al.,

2021). Em contrapartida, a secagem por radiação IV tende a alterar os compostos termolábeis e as propriedades físicas do material, ocasionando encolhimento, endurecimento, alteração da microestrutura, entre outros (Majumder et al., 2021).

Na literatura, tem-se muitos trabalhos com a SCE para as frutas, tais como: melão cantaloupe (Li et al., 2021), abacate (Koç & Yüksel, 2020), cumbeba (Diógenes et al., 2022), kadam (Osama et al., 2022), tomate (Qadri, 2022), mamão (Qadri et al., 2020), pêssego (Brar et al., 2020), maracujá (Samyot et al., 2021), bacaba (Cól et al., 2021), banana (Watharkar et al., 2021), romã (Aktas & Tontul, 2021), etc. Nenhum trabalho com SCE para polpa de jabuticaba com aplicação de ar aquecido, bem como combinada com aplicação da radiação IV (com ar não aquecido) foi encontrado na literatura científica. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba aplicando ar aquecido (técnica convencional), e radiação IV, bem como determinar as características físicas e o teor de antocianinas totais dos pós da polpa de jabuticaba obtidos nestes processamentos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Matéria-prima

Para o preparo da espuma, foram utilizados polpa de jabuticaba e albumina de ovo em pó. A polpa de jabuticaba congelada sem adição de água, aditivos ou outros ingredientes foi adquirida da empresa De Marchi (Campinas, São Paulo, Brasil), transportada para o Laboratório de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Lavras (UFLA) sob refrigeração e armazenada em um congelador até o momento do uso. A albumina de ovo em pó foi doada pela indústria ASA – Aviário Santo Antônio LTDA (Nepomuceno, Minas Gerais, Brasil) e armazenada em embalagens herméticas, local seco, ao abrigo da luz e a temperatura ambiente.

### 2.2. Caracterização da polpa de jabuticaba

A polpa de jabuticaba (PJ) foi caracterizada quanto à umidade, atividade de água, cor e densidade. Para determinar a umidade, utilizou-se uma estufa de secagem a vácuo a 70 °C até peso constante AOAC (2010). A atividade de água ( $a_w$ ) da PJ foi mensurada diretamente por meio do medidor de  $a_w$  AQUALAB (3TE, Decagon Devices). A análise de cor foi realizada pela leitura direta com um espectrofotômetro (Konica Minolta, modelo CM-5, Tóquio, Japão) configurado com o iluminante D<sub>65</sub> e calibrado com um padrão branco do próprio equipamento no sistema de coordenadas CIEL\* $a^*b^*$ . A amostra foi colocada uniformemente em uma placa de Petri e, em seguida, foi analisada a temperatura ambiente. Os parâmetros cromáticos são  $L^*$ , a luminosidade, ( $L^* = 0$  para preto e  $L^* = 100$  para branco),  $a^*$  (verde [-] ao vermelho [+]) e  $b^*$  (azul [-] ao amarelo [+]), tonalidade ( $h^\circ$ ) e a saturação ( $C^*$ ). A densidade da PJ foi determinada usando o método por picnometria descrito por Karim e Wai (1999) com medidas de massa ( $m$ ) e volume ( $V$ ), expressas em  $\text{kg m}^{-3}$ , conforme Equação (9):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

### 2.3. Preparo e caracterização da espuma de polpa de jabuticaba

As espumas da polpa de jabuticaba (EJ) foram obtidas utilizando 7,5 g de albumina para 92,5 g de polpa de jabuticaba (PJ) seguida de agitação mecânica (posição 12) por 10 min com auxílio de uma batedeira doméstica (Oster, modelo OBAT621, China). Estes parâmetros foram definidos em pré-testes. Avaliou-se a cor e a densidade da EJ similarmente como descrito para

a PJ. Obteve-se a densidade da EJ pesando a massa de um volume fixo da EJ (25 mL) por meio de um picnômetro de 25 mL, garantindo que não houvesse espaço vazio.

A estabilidade da espuma foi determinada por meio do volume drenado usando o método descrito por Sauter e Montoure (1972) com ligeiras modificações. Colocou-se 50 g da EJ em um funil de Büchner de 80 mm de diâmetro o qual encontrava-se previamente com o fundo coberto por um papel filtro Whatman nº 1 e, então, foi inserido em uma proveta graduada de 25 mL. O volume, em mL, de líquido separado da espuma pela ação da gravidade e coletado na proveta foi tomado como o resultado da drenagem após 60 min sob condição ambiente.

A expansão da EJ foi calculada pela Equação (10) com objetivo de determinar o volume de ar incorporado à EJ conforme o protocolo utilizado por Dehghannya et al. (2018):

$$Expansão = \left( \frac{\frac{1}{\rho_{EJ}} - \frac{1}{\rho_{PJ}}}{\frac{1}{\rho_{PJ}}} \right) \times 100 \quad (10)$$

em que:  $\rho_{PJ}$  e  $\rho_{EJ}$  correspondem às densidades da polpa de jabuticaba e da espuma da polpa de jabuticaba, respectivamente, expressas em  $\text{kg m}^{-3}$ .

#### 2.4. Experimentos de secagem

Os experimentos de secagem foram conduzidos de acordo com um planejamento fatorial  $3^2$  com duas réplicas no ponto central, totalizando 11 corridas para cada técnica aplicada. A Tabela 1 mostra o planejamento experimental para os fatores temperatura e velocidade do ar para a secagem convencional, e a Tabela 2 mostra o planejamento experimento para os fatores potência da radiação infravermelha e velocidade do ar para a secagem IV. Assumiu-se um modelo de regressão quadrático dado pela Equação (11) para prever a resposta  $y$  (tempo de secagem, atividade de água e antocianinas totais) usando o software Statistica 8 (Stat Soft. Inc., Tulsa, OK, Estados Unidos):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=1}^2 \beta_{ij} x_i x_j \quad (11)$$

em que  $y$  é a função resposta,  $\beta_0$  é um termo constante (a média),  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes linear, quadrático e da interação, respectivamente, da regressão, e  $x_i$  e  $x_j$  representam os fatores codificados temperatura do ar e velocidade do ar (Tabela 1), respectivamente, no caso da secagem com ar aquecido; e potência da radiação IV e velocidade do ar não aquecido (Tabela 2), respectivamente, no caso da secagem infravermelho com ar não aquecido.

Tabela 1 – Níveis reais e codificados (entre parênteses) da temperatura e velocidade do ar de secagem para cada condição de secagem do método convencional

Tratamento	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do ar (m s <sup>-1</sup> )
1	50 (-1)	0,5 (-1)
2	50 (-1)	1,0 (0)
3	50 (-1)	1,5 (+1)
4	60 (0)	0,5 (-1)
5	60 (0)	1,0 (0)
6	60 (0)	1,5 (+1)
7	70 (+1)	0,5 (-1)
8	70 (+1)	1,0 (0)
9	70 (+1)	1,5 (+1)
10	60 (0)	1,0 (0)
11	60 (0)	1,0 (0)

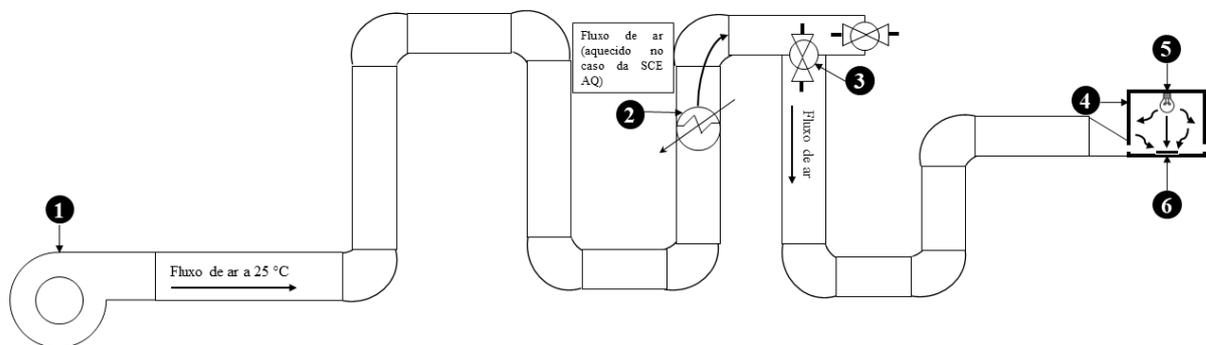
Tabela 2 – Níveis reais e codificados (entre parênteses) da potência da radiação IV e velocidade do ar de secagem para cada condição de secagem aplicando IV

Tratamento	Potência da radiação IV (W)	Velocidade do ar (m s <sup>-1</sup> )
1	90 (-1)	0,5 (-1)
2	90 (-1)	1,0 (0)
3	90 (-1)	1,5 (+1)
4	130 (0)	0,5 (-1)
5	130 (0)	1,0 (0)
6	130 (0)	1,5 (+1)
7	170 (+1)	0,5 (-1)
8	170 (+1)	1,0 (0)
9	170 (+1)	1,5 (+1)
10	130 (0)	1,0 (0)
11	130 (0)	1,0 (0)

A EJ foi colocada em uma bandeja de alumínio de diâmetro de 100 mm e 9,0 mm de espessura e, então, inserida em uma câmara de secagem convectiva com as superfícies revestidas por um material reflexivo para que toda radiação infravermelha incidisse sobre a amostra como mostrado na Figura 1. A lâmpada emissora de radiação IV permaneceu desligada para a SCE AQ, enquanto para a SCE IV, ligada. A potência da radiação IV foi determinada/aferida previamente antes dos experimentos de secagens como o produto entre a

voltagem e a corrente elétrica. A amostra foi pesada a cada cinco minutos em uma balança que se encontrava ao lado da câmara de secagem. Cessou-se a secagem após três pesagens com valores consecutivos iguais. Após alcançar o equilíbrio dinâmico, o pó de polpa de jabuticaba (SJ) foi removido da bandeja com o auxílio de uma espátula e armazenado em embalagens herméticas até as análises. A temperatura da superfície da EJ foi mensurada por um pirômetro infravermelho Fluke 62 Max antes que a mostra fosse removida da câmara de secagem para a pesagem através do orifício de saída do ar de modo que a câmara de secagem se mantivesse fechada. A umidade relativa do ar média foi de  $56 \pm 6\%$ .

Figura 1 – Diagrama do secador



- (1) Soprador;
- (2) aquecedor;
- (3) válvula(s);
- (4) câmara de secagem revestida com material reflexivo;
- (5) lâmpada emissora de radiação infravermelho; e
- (6) amostra.

A razão de umidade (RX) foi calculada como pela Equação (12):

$$RX = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (12)$$

em que:  $X$  é o conteúdo de umidade no tempo  $t$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $X_0$  é o conteúdo de umidade inicial ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e  $X_{eq}$  é o conteúdo de umidade de equilíbrio ( $\text{kg kg}^{-1}$ ), todos em base seca (b.s.). O conteúdo de umidade foi determinado conforme descrito no item 2.2.

## 2.5. Otimização com a metodologia da desejabilidade

A otimização de múltiplas respostas foi realizada pela abordagem da função da desejabilidade (Derringer & Suich, 2018). Para o presente estudo, a desejabilidade individual ( $d_i$ ) da  $i$ -ésima resposta ( $i = 1, 2$ ) variando entre 0 e 1 foi avaliada utilizando a Equação (13)

para maximizar o conteúdo de antocianinas totais e a Equação (5) para minimizar o tempo de secagem, as quais representam variáveis de qualidade e processo, respectivamente, considerando que ambas as respostas possuem o mesmo peso.

$$d_i = \begin{cases} 0, & \text{se } Y_i < C_i \\ \left(\frac{Y_i - C_i}{T_i - C_i}\right), & \text{se } C_i \leq Y_i \leq T_i \\ 1, & \text{se } Y_i > T_i \end{cases} \quad (13)$$

$$d_i = \begin{cases} 0, & \text{se } Y_i > U_i \\ \left(\frac{Y_i - U_i}{T_i - U_i}\right), & \text{se } T_i \leq Y_i \leq U_i \\ 1, & \text{se } Y_i < T_i \end{cases} \quad (14)$$

em que:  $Y_i$  representa as duas respostas avaliadas,  $T_i$  é o valor alvo,  $C_i$  e  $U_i$  correspondem ao valor ajustado desejado mais baixo e mais alto, respectivamente, para a resposta  $Y_i$ , com a condição  $C_i < T_i < U_i$ .

A desejabilidade global ( $D(x)$ ) foi calculada combinando as desejabilidades individuais por meio da média geométrica.

$$D(x) = \left( \prod_{i=1}^2 d_i \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

O valor de  $D(x)$  varia entre 0 e 1 e, com base em seu valor, pode-se classificar a desejabilidade global conforme proposto por Lazic (2004) e mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativas padrão na escala de desejabilidade

Estimativas padrão	Desejos	Qualidade do produto
1,00	Excelente	O máximo em “satisfação” ou qualidade e melhoria além desse ponto não teria valor apreciável.
1,00–0,80	Muito bom	Aceitável e excelente, representa qualidade incomum ou desempenho, muito além de qualquer coisa disponível comercialmente.

0,80–0,63	Bom	Aceitável e bom, representa uma melhoria em relação à melhor qualidade comercialmente disponível, tendo esta última o valor de 0,63.
0,63–0,37	Satisfatório	Aceitável, mas ruim. A qualidade é aceitável para os limites de especificação, mas a melhoria é desejada.
0,37–0,20	Ruim	Inaceitável. Materiais desta qualidade levariam ao fracasso o projeto.
0,20–0,00	Muito ruim	Completamente inaceitável.

Fonte: Lazic (2004, p. 176).

## 2.6. Tratamentos dos dados de cinética de secagem

A cinética de secagem foi descrita matematicamente pelos modelos de Newton, Page e Henderson-Pabis por meio da regressão não linear como posto na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos da cinética de secagem

Modelo	Equação	Referência
Newton	$RX = e^{-kt}$	Bruce (1985)
Page	$RX = e^{-kt^n}$	Page (1949)
Henderson-Pabis	$RX = ae^{-kt}$	Henderson e Pabis (1961)

Nota: a (–), k (s<sup>-1</sup>) e n (–) são coeficientes do modelo de secagem, t (s) é o tempo de secagem.

A qualidade do ajuste do modelo proposto foi avaliada com base no coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e raiz do erro quadrático médio (REQM).  $\chi^2$  e REQM foram calculados pelas Equações (16) e (17), respectivamente:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RX_{exp,i} - RX_{pre,i})^2}{N - z} \quad (16)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RX_{pre,i} - RX_{exp,i})^2}{N}} \quad (17)$$

em que:  $RX_{pre,i}$  é a i-ésima razão de umidade predita,  $RX_{exp,i}$  é a i-ésima razão de umidade experimental, N é o número de observações, e z é o número de constantes do modelo de secagem. A acurácia de cada um dos modelos para predizer o comportamento da SCE da EJ se considerou o valor de R<sup>2</sup> próximo da unidade, enquanto para  $\chi^2$  e REQM, os valores mais baixos.

A difusidade efetiva da umidade ( $D_{ef}$ ) da EJ foi estimada pela segunda lei da difusão de Fick para uma placa plana delgada (*slab*) com base na Equação (18):

$$RX = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2}\right) \quad (18)$$

em que:  $D_{ef}$  é a difusidade efetiva da água ( $m^2 s^{-1}$ ),  $n$  é o número de termos da série ( $n = 40$ ),  $L$  é a espessura da amostra ( $9 \times 10^{-3}$  m),  $t$  é o tempo de secagem (s),  $RX$  é a razão da umidade (–). A  $D_{ef}$  foi estimada por meio da regressão não linear pelo software Statistica 8.0 (Stat Soft. Inc., Tulsa, OK, Estados Unidos).

A taxa de secagem foi calculada pela Equação (19):

$$\text{Taxa de secagem} = \frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \quad (19)$$

em que:  $X_t$  é o conteúdo de umidade no tempo  $t$ ,  $X_{t+\Delta t}$  é o conteúdo de umidade no tempo  $t + \Delta t$ , expressos em kg água (kg sólido seco  $s^{-1}$ ) em base seca (b.s.) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (s).

## 2.7. Caracterização do produto final

### 2.7.1. Densidade bulk e tapped

A densidade bulk ( $\rho_{bulk}$ ) foi determinada por meio do volume ocupado por 2,0 g do SJ em uma proveta graduada de 10 mL e calculada pela Equação (20) (DEHGHANNYA et al., 2018):

$$\rho_{bulk} = \frac{\text{massa do SJ}}{\text{volume da proveta}} \quad (20)$$

em que: a massa e o volume do SJ são expressos em kg e  $m^3$ , respectivamente.

A densidade tapped ( $\rho_{tapped}$ ) foi determinada de forma similar à  $\rho_{bulk}$ . No entanto, a proveta graduada foi solta por dez vezes de uma altura de 0,15 m sobre um leito de EVA e

registrou-se o volume final, sendo a  $\rho_{tapped}$  calculada pela Equação (21) (DEHGHANNYA et al., 2018):

$$\rho_{tapped} = \frac{\text{massa do SJ}}{\text{volume compactado final do SJ}} \quad (21)$$

em que: a massa e o volume compactado do SJ são expressos em kg e m<sup>3</sup>, respectivamente.

### 2.7.2. Densidade de partícula

A densidade de partícula do pó de polpa de jabuticaba foi determinada de acordo com o método descrito por Sørensen et al. (1978), com ligeiras modificações. Transferiu-se 1 g do SJ para uma proveta graduada de 10 mL com tampa e adicionou-se 5 mL de éter de petróleo. Agitou-se a proveta graduada para melhorar a dispersão das partículas do SJ. Adicionou-se 1 mL de éter de petróleo para decantar as partículas aderidas à superfície da proveta. Assim, o volume total de éter de petróleo (6,0 mL) com partículas de SJ dispersas foi registrado e a densidade de partícula foi calculada com base na Equação (22):

$$\rho_{particula} = \left( \frac{\text{massa do SJ}}{\text{volume total do éter de petróleo com as partículas do SJ dispersas} - 6} \right) \times 1000 \quad (22)$$

em que: a massa do SJ é expressa em g, o volume total do éter de petróleo com as partículas do SJ dispersas é expresso em mL, e 1000 é o fator de conversar de g mL<sup>-1</sup> para kg m<sup>-3</sup>.

### 2.7.3. Porosidade

A porosidade ( $\varphi$ ) do SJ foi determinada pela razão entre a densidade bulk e a de partícula (DEHGHANNYA et al., 2018):

$$\varphi = \left( 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{particula}} \right) \times 100 \quad (23)$$

em que:  $\rho_{bulk}$  e  $\rho_{particula}$  são expressas em  $kg\ m^{-3}$ .

#### 2.7.4. Capacidade de escoamento

A capacidade de escoamento (do inglês “*flowability*”) foi determinada por meio do índice de Carr (IC), que avalia a fluidez do pó, e a razão de Hausner (RH), que avalia a coesão do pó, (DEHGHANNYA et al., 2018):

$$IC = \left(1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{tapped}}\right) \times 100 \quad (24)$$

$$RH = \frac{\rho_{tapped}}{\rho_{bulk}} \quad (25)$$

em que:  $\rho_{bulk}$  e  $\rho_{tapped}$  são expressas em  $kg\ m^{-3}$ . A classificação para a capacidade de escoamento do pó encontra-se na Tabela 5:

Tabela 5 – Classificação da capacidade de escoamento do pó com base no índice de Carr e na razão de Hausner

Capacidade de escoamento	Índice de Carr (%)	Razão de Hausner (-)
Excelente	0–10	1,00–1,11
Boa	11–15	1,12–1,18
Aceitável	16–20	1,19–1,25
Razoável	21–25	1,26–1,34
Ruim	26–31	1,35–1,45
Muito ruim	32–37	1,46–1,59
Muito, muito ruim	> 38	>1,60

#### 2.7.5. Medida da cor

A diferença total de cor ( $\Delta E$ ) foi calculada para o SJ com relação a PJ usando a Equação (26):

$$\Delta E = \left( (L_{PJ}^* - L_{SJ}^*)^2 + (a_{PJ}^* - a_{SJ}^*)^2 + (b_{PJ}^* - b_{SJ}^*)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

em que:  $L^*_{PJ}$ ,  $a^*_{PJ}$  e  $b^*_{PJ}$  referem-se à luminosidade, ao verde-vermelho e ao azul-amarelo da polpa de jabuticaba, respectivamente;  $L^*_{SJ}$ ,  $a^*_{SJ}$  e  $b^*_{SJ}$  referem-se à luminosidade, ao verde-vermelho e ao azul-amarelo do pó da polpa de jabuticaba, respectivamente.

O índice de escurecimento (IE) e o índice de brancura (IB) foram calculados de acordo com as equações (27) e (29), respectivamente, a fim de avaliar a mudança nas cores ocasionadas ao material durante a secagem.

$$IE = \frac{100(\chi - 0,31)}{0,172} \quad (27)$$

em que:

$$\chi = \frac{(a^*_{SJ} + 1,75L^*_{SJ})}{(5,645L^*_{SJ} + a^*_{SJ} - 3,012b^*_{SJ})} \quad (28)$$

$$IB = 100 - \left( (100 - L^*_{SJ})^2 + a^*_{SJ} + b^*_{SJ} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

em que:  $L^*_{SJ}$ ,  $a^*_{SJ}$  e  $b^*_{SJ}$  referem-se à luminosidade, ao verde-vermelho e ao azul-amarelo do pó da polpa de jabuticaba, respectivamente.

### 2.7.6. Conteúdo de antocianinas totais

O conteúdo total de antocianinas foi determinado por espectrofotômetro segundo Lees e Francis (1972) adaptado por Barcia et al. (2012). A extração dos compostos fenólicos dos SJ foi realizada utilizando 1,0 g do SJ no qual foi adicionado 25 mL de etanol acidificado pH = 1,0 com ácido clorídrico, incubou-se por uma hora a temperatura ambiente. Filtrou-se e completou-se o volume para 50 mL com etanol acidificado. Em seguida, realizou-se a leitura em um espectrofotômetro no comprimento de onda de 535 nm. A solução de etanol acidificado foi utilizada como branco. A quantificação das antocianinas totais se baseou no coeficiente de extinção molar da cianidina-3-glicosídeo, a qual representa a principal antocianina presente em frutos. Os resultados foram expressos em mg de cianidina-3-glicosídeo por 100 g de SJ.

$$\text{Conteúdo total de antocianinas} = \frac{Abs \times MM \times FD \times 100}{\alpha \times 1} \left[ \frac{mg}{100 g} \right] \quad (30)$$

em que: Abs é a absorvância da amostra (-); MM é a massa molecular da cianidina-3-glicosídeo ( $449,2 \text{ g mol}^{-1}$ ); FD é o fator de diluição (-);  $\alpha$  é a absorvidade molar ( $26900 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ); e l é o comprimento do percurso (cm).

## **2.8. Tratamento estatístico**

As análises estatísticas foram efetuadas por meio do software Statistica 8.0 (Stat Soft. Inc., Tulsa, OK, Estados Unidos). Aplicou-se o teste t de Student para determinar se houve diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre a PJ e a EJ, e entre os SJ obtidos pelas SCE AQ e SCE IV para a densidade bulk, densidade tapped, densidade de partícula, porosidade, índice de Carr, razão de Hausner, índice de escurecimento, índice de brancura e diferença total de cores, visto que não geraram superfícies de resposta, visto que somente a média se mostrou significativa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caracterização da polpa e da espuma de jabuticaba

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos para as propriedades da polpa e da espuma da polpa de jabuticaba. Destes resultados, constatou-se um valor de 92,15% (b.u.) para a umidade da PJ e 82,43% (b.u.) para a EJ. A redução significativa ( $p \leq 0,05$ ) do conteúdo de umidade para a EJ pode estar relacionada ao aumento dos sólidos totais que ocorre com a adição de albumina de ovo, assim como observado por Nunes, Nascimento e Lima-Corrêa (2022) para espuma de polpa de talo de cenoura preparada a partir de polpa dos talos de cenoura e 10% ( $m^{-1}$ ) de Emustab<sup>®</sup>. Para a  $a_w$ , houve redução significativa ( $p \leq 0,05$ ) para a EJ (0,961) quando comparada a PJ (0,985) o qual corrobora com os resultados encontrados por Chaves et al. (2013), que averiguaram que agentes espumantes auxiliam a reduzir a  $a_w$  em polpa ao transformá-la em espuma. Outro fator que pode contribuir com essa redução é a agitação mecânica, que pode ter acarretado mudança na estrutura das proteínas, levando à redução da  $a_w$  pela diminuição da capacidade de reter água (Azizpour et al., 2016).

Tabela 6 – Caracterização física da polpa e da espuma da polpa de jabuticaba

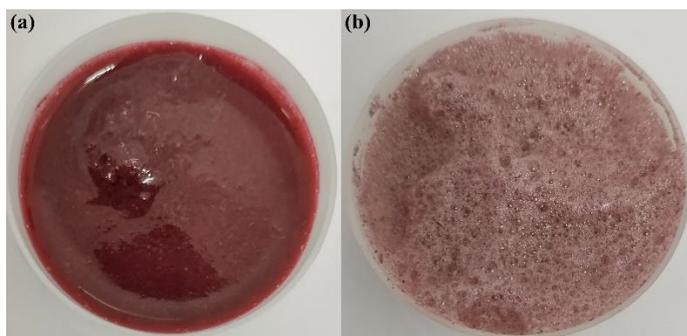
Propriedades	Polpa de jabuticaba (PJ)	Espuma da polpa de jabuticaba (EJ)
umidade (% , b.u.)	92,15 ± 0,01 <sup>a</sup>	82,43 ± 0,76 <sup>b</sup>
atividade de água [-]	0,985 ± 0,006 <sup>a</sup>	0,961 ± 0,007 <sup>b</sup>
L*	17,60 ± 0,22 <sup>b</sup>	69,87 ± 0,26 <sup>a</sup>
a*	18,59 ± 0,19 <sup>a</sup>	8,57 ± 0,10 <sup>b</sup>
b*	2,63 ± 0,17 <sup>a</sup>	2,91 ± 0,06 <sup>a</sup>
C*	18,78 ± 0,22 <sup>a</sup>	9,06 ± 0,14 <sup>b</sup>
h°	8,07 ± 0,44 <sup>b</sup>	18,76 ± 0,14 <sup>a</sup>
densidade [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	1024,70 ± 0,04 <sup>a</sup>	191,92 ± 0,01 <sup>b</sup>
estabilidade [mL],	–	100,0% ± 0,0
expansão [%]	–	57,65 ± 0,01

Valores expressos como a média ± desvio padrão. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) de acordo com o teste t de Student.

A análise de cor (Tabela 6) indicou mudança significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre a PJ e a EJ para a maioria dos parâmetros, exceto para a coordenada de cromaticidade b\* ( $p > 0,05$ ). A EJ mostrou-se mais clara (69,87) do que a PJ (17,60) como mostra o valor de L\*. O fenômeno ocorreu em virtude da adição de partículas mais claras como é o caso da albumina e

incorporação de ar à mistura (Gupta et al., 2021). Borges, Borél e Lima-Corrêa (2022) observaram o mesmo fenômeno no parâmetro  $L^*$  ao transformar polpa de couve (27,14) em espuma (43,40). O valor para a coordenada de cromaticidade  $a^*$  variou entre 18,59 e 8,57 para PJ e EJ, respectivamente. O parâmetro cromático  $a^*$  está atrelado às antocianinas presentes na jabuticaba as quais conferem as cores roxa, vermelha e azul a várias plantas (INADA et al., 2020). A redução do valor de  $a^*$  significa perda de vermelho que pode ser efeito visual do aumento da luminosidade em virtude da incorporação de ar e adição da albumina à PJ e não se referir à degradação das antocianinas (Figura 2). A tonalidade entre PJ (8,07) e EJ (18,76) ficou entre o vermelho ( $0^\circ$ ) e o amarelo ( $90^\circ$ ), estando muito mais próximo do vermelho. A PJ (8,07) mostrou-se mais vermelha do que EJ (18,76) em razão do menor valor de  $h^\circ$ , estando, portanto, mais próximo do eixo  $a^*$ , conseqüentemente, mais vermelha. A redução da saturação (PJ: 18,78; EJ: 9,06) mostrou que EJ tornou-se menos intensa em relação à cor de PJ. Os efeitos visuais relacionados a cor são mostrados na Figura 2.

Figura 2 – (a) polpa da jabuticaba e (b) espuma da polpa de jabuticaba



Para a densidade, um dos parâmetros mais importantes para aplicação da secagem em camada em espuma, os resultados (Tabela 6) mostraram redução significativa (81%) ( $p \leq 0,05$ ) e encontrou-se dentro da faixa de aplicação para a secagem em camada de espuma proposta por van Arsdel e Copley (1964) ( $100 - 600 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Valores baixos para a densidade da espuma fornecem aumento da área de superfície, o que acelera a taxa de evaporação de água durante a secagem em camada de espuma (Ng & Sulaiman, 2018; Tekgül, 2021).

Além da densidade, assegurar a estabilidade da espuma mostra-se fundamental, pois garante que a qualidade do produto final não seja prejudicada, além de facilitar a remoção do produto da bandeja de secagem, aumentar a porosidade da espuma, a taxa de secagem, por conseguinte, diminuir o tempo de secagem (ABBASI; AZIZPOUR, 2016; KOÇ; YÜKSEL, 2020). A EJ apresentou-se estável, visto que não houve líquido drenado (Tabela 6), ou seja, 100% de estabilidade. A de adição albumina como agente espumante eleva a concentração de

proteínas na PJ, conseqüentemente, ocasiona espessamento do filme interfacial que auxilia a estabilizar a espuma (Zayas, 1997, p. 268). Ng e Sulaiman (2018) reportaram que a espuma de polpa de beterraba com 10% de albumina de ovo mostrou a maior estabilidade (97,50% em 180 min de teste) comparada com os tratamentos a 5% de albumina, 5-10% de gelatina de peixe e maltodextrina. Osama et al. (2022) reportaram que a espumas da polpa de kadam elaboradas com albumina de ovo entre 5 e 15% se apresentaram totalmente estáveis durante as 3 h de análise.

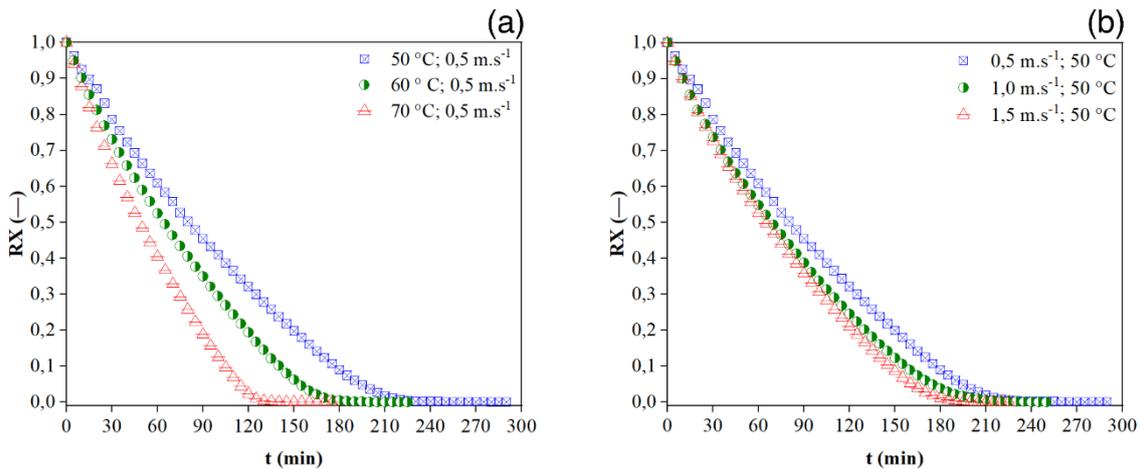
Em relação a expansão da espuma, os resultados (Tabela 6) mostraram que a EJ expandiu em um valor de 57,65%. A expansão afeta diretamente a densidade do material, que, neste caso, teve uma redução de 81% aproximadamente (Tabela 6 de 1024,70 para 191,92 kg.m<sup>-3</sup>). O aumento na expansão representa diminuição da densidade da espuma pela incorporação de ar no material (Tan & Sulaiman, 2020). Segundo Yüksel (2021), “durante a secagem, baixa densidade da espuma pode promover melhor remoção de água devido a maior área superficial”. Ng e Sulaiman (2018) obtiveram uma expansão entre 40,07 e 64,31% para espuma de beterraba com adição de albumina e agitação por 05 e 10 min, respectivamente. Em 10 min de agitação, 70% de expansão foi alcançada para espuma de polpa de abacaxi com albumina como agente espumante no estudo de Shaari et al. (2018).

### **3.2. Cinética de secagem da espuma da polpa de jabuticaba: com ar aquecido (método convencional), e aplicação de IV**

A Figura 3 (a–b) mostra resultado típico das curvas das cinéticas de secagens em camada de espuma da polpa de jabuticaba com 9,0 mm de espessura, sob a temperatura do ar de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m s<sup>-1</sup>, que representa a evolução da razão do conteúdo de umidade em função do tempo. O comportamento das curvas para as outras condições de temperatura e velocidade do ar de secagem foi similar ao mostrado na Figura 3. Ao elevar a temperatura de 50 para 70 °C a 0,5; 1,0 e 1,5 m s<sup>-1</sup>, a redução no tempo de secagem foi de aproximadamente 40% (175–290 min), 40% (150–250 min) e 42% (130–225 min), respectivamente. Assim, houve redução do tempo de secagem ao elevar a temperatura do ar de secagem (Figura 3). O comportamento observado no presente estudo está de acordo com os relatos na literatura para secagem em camada de espuma para hidrolisado de grão de arroz (Sritongtae et al., 2017), polpa de manga (Lobo et al., 2016), polpa de fruta-do-conde (Khodifad & Kumar, 2019), suco de uva (Tavares et al., 2019), polpa de cumbeba (Diógenes et al., 2022), polpa de couve (Borges et al., 2022) e purê de abóbora (PANATO; MULLER, 2022). Constatat-

se, ainda, que o tempo de secagem reduziu com o aumento da velocidade do ar de secagem. Em 50, 60 e 70 °C, a redução no tempo de secagem foi de 22,4% (225–290 min) ao aumentar a velocidade de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup>; 24,4% (170–225 min); e 25,7% (130–170 min), respectivamente.

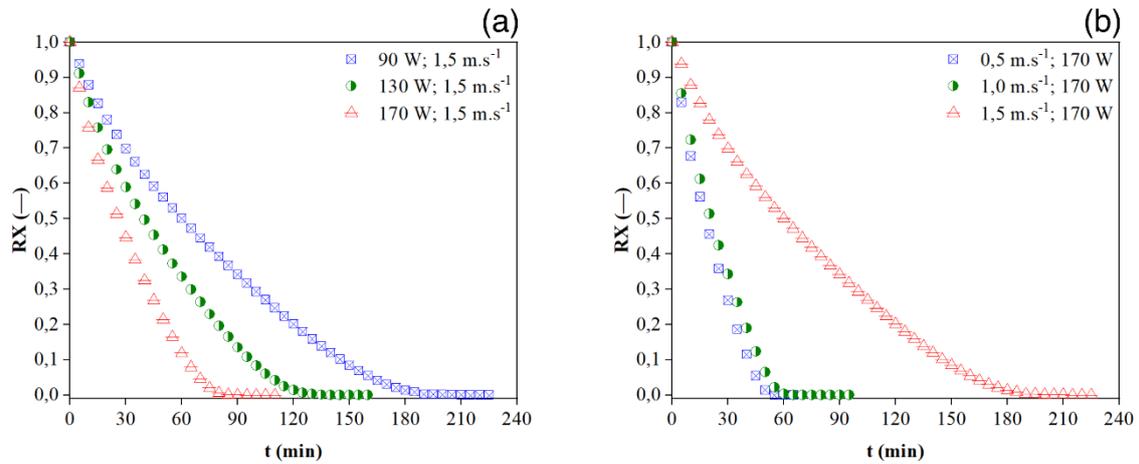
Figura 3 – Evolução temporal da remoção da razão de umidade em camada de espuma da polpa de jabuticaba em diferentes temperaturas (50, 60 e 70 °C) a 0,5 m s<sup>-1</sup> e velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m s<sup>-1</sup>) a 50 °C



A evolução da remoção de umidade (RX) da EJ em função do tempo em diferentes potências (90, 130 e 170 W) e velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m s<sup>-1</sup>) está posta na Figura 4 (a–b). Foi possível observar que ao aumentar a potência da radiação IV ocasionou redução no tempo de secagem. Ao elevar a potência de 90 para 170 W a 0,5; 1,0 e 1,5 m s<sup>-1</sup>, a redução no tempo de secagem foi de aproximadamente 64% (65–180 min), 57% (95–220 min) e 51% (110–225 min), respectivamente. Elevar a potência da radiação IV implicou em maior absorção de calor pela EJ que proporcionou uma maior força motriz à transferência de massa, aumento da taxa de secagem e, por conseguinte, redução do tempo de secagem (Kayran & Doymaz, 2019).

Quanto à influência do ar de secagem (Figura 4 (b)), verificou-se que houve aumento no tempo de secagem ao aumentar a velocidade do ar sob potência da radiação IV constante o que mostra um arrefecimento da superfície da EJ como pode ser observado na Figura 6 (a). O mesmo comportamento foi observado por Adak, Heybeli e Ertekin (2017) para secagem de morango com secagem convectiva auxiliada por radiação infravermelho.

Figura 4 – Evolução temporal da remoção da razão de umidade em camada de espuma da polpa de jabuticaba em diferentes potências (90, 130 e 170 W) e velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m s<sup>-1</sup>) de secagem



### 3.3. Representação matemática da cinética de secagem em camada delgada

No presente estudo, três modelos clássicos (Newton, Page e Henderson-Pabis) foram avaliados para escolher o modelo mais adequado para representar a cinética de secagem em camada de espuma delgada para polpa de jabuticaba, em ambos os processos aplicados. Os parâmetros de cada modelo bem como os parâmetros estatísticos estão apresentados na Tabela 7 para a SCE AQ e na Tabela 8 para a SCE IV. Os resultados mostraram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de modo a descrever o processo de secagem tanto para a SCE AQ, quanto à SCE IV, uma vez que os parâmetros estatísticos foram  $R^2 = 0,990$ ,  $\chi^2 = 0,0011$  e  $REQM = 0,032$ ;  $R^2 = 0,908$ ,  $\chi^2 = 0,0009$  e  $REQM = 0,027$ , respectivamente. O modelo de Page também se mostrou o mais apropriado para representar a secagem em camada de espuma para hidrolisado de grão de arroz germinado (Sritongtae et al., 2017) e de purê de abóbora a 45 e 65 °C (Panato & Muller, 2022).

Tabela 7 – Resultados estatísticos dos ajustes dos modelos de Newton, Page e Henderson-Pabis para os dados experimentais da secagem com ar aquecido

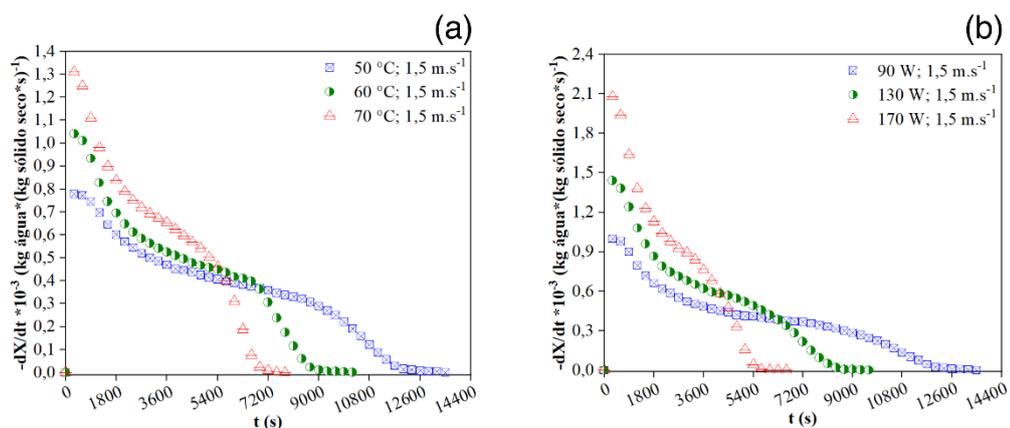
Modelo	Parâmetros	Tratamento											Média
		50 °C e 0,5 m s <sup>-1</sup>	50 °C e 1,0 m s <sup>-1</sup>	50 °C e 1,5 m s <sup>-1</sup>	60 °C e 0,5 m s <sup>-1</sup>	60 °C e 1,0 m s <sup>-1</sup>	60 °C e 1,5 m s <sup>-1</sup>	70 °C e 0,5 m s <sup>-1</sup>	70 °C e 1,0 m s <sup>-1</sup>	70 °C e 1,5 m s <sup>-1</sup>	60 °C e 1,0 m s <sup>-1</sup>	60 °C e 1,0 m s <sup>-1</sup>	
Newton	k (s <sup>-1</sup> )	1,74×10 <sup>-4</sup>	2,01×10 <sup>-4</sup>	2,14×10 <sup>-4</sup>	2,19×10 <sup>-4</sup>	2,74×10 <sup>-4</sup>	2,97×10 <sup>-4</sup>	2,94×10 <sup>-4</sup>	3,37×10 <sup>-4</sup>	3,81×10 <sup>-4</sup>	2,54×10 <sup>-4</sup>	2,91×10 <sup>-4</sup>	–
	R <sup>2</sup>	0,961	0,969	0,966	0,962	0,967	0,968	0,960	0,968	0,968	0,964	0,966	0,885
	χ <sup>2</sup>	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,0034
	REQM	0,062	0,053	0,056	0,061	0,057	0,055	0,063	0,055	0,056	0,059	0,057	0,053
Page	k (s <sup>-1</sup> )	5,00×10 <sup>-6</sup>	1,40×10 <sup>-5</sup>	1,30×10 <sup>-5</sup>	9,00E×10 <sup>-6</sup>	1,40×10 <sup>-5</sup>	2,30×10 <sup>-5</sup>	1,00×10 <sup>-5</sup>	2,40×10 <sup>-5</sup>	3,00×10 <sup>-5</sup>	1,50×10 <sup>-5</sup>	1,50×10 <sup>-5</sup>	–
	n (–)	1,396	1,308	1,327	1,376	1,346	1,308	1,407	1,323	1,315	1,341	1,357	–
	R <sup>2</sup>	0,991	0,990	0,989	0,989	0,989	0,988	0,990	0,989	0,988	0,990	0,991	0,990
	χ <sup>2</sup>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0011
	REQM	0,030	0,030	0,032	0,032	0,033	0,033	0,031	0,032	0,033	0,031	0,030	0,032
Henderso n-Pabis	k (s <sup>-1</sup> )	1,90×10 <sup>-4</sup>	2,15×10 <sup>-4</sup>	2,29×10 <sup>-4</sup>	2,37×10 <sup>-4</sup>	2,73×10 <sup>-4</sup>	3,15×10 <sup>-4</sup>	3,19×10 <sup>-4</sup>	3,58×10 <sup>-4</sup>	4,03×10 <sup>-4</sup>	2,93×10 <sup>-4</sup>	3,13×10 <sup>-4</sup>	–
	a (–)	1,100	1,071	1,075	1,087	1,077	1,067	1,093	1,069	1,063	1,078	1,083	–
	R <sup>2</sup>	0,970	0,974	0,972	0,969	0,970	0,973	0,969	0,973	0,972	0,972	0,973	0,972
	χ <sup>2</sup>	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
	REQM	0,054	0,048	0,051	0,048	0,053	0,051	0,056	0,051	0,052	0,051	0,051	0,052

Tabela 8 – Resultados estatísticos dos ajustes dos modelos de Newton, Page e Henderson-Pabis para os dados experimentais da secagem com radiação aquecido

Modelo	Parâmetros	Tratamento											Média
		90 W e 0,5 m s <sup>-1</sup>	90 W e 1,0 m s <sup>-1</sup>	90 W e 1,5 m s <sup>-1</sup>	130 W e 0,5 m s <sup>-1</sup>	130 W e 1,0 m s <sup>-1</sup>	130 W e 1,5 m s <sup>-1</sup>	170 W e 0,5 m s <sup>-1</sup>	170 W e 1,0 m s <sup>-1</sup>	170 W e 1,5 m s <sup>-1</sup>	130 W e 1,0 m s <sup>-1</sup>	130 W e 1,0 m s <sup>-1</sup>	
Newton	k (s <sup>-1</sup> )	2,80×10 <sup>-4</sup>	2,30×10 <sup>-4</sup>	2,23×10 <sup>-4</sup>	4,85×10 <sup>-4</sup>	4,79×10 <sup>-4</sup>	3,39×10 <sup>-4</sup>	7,72×10 <sup>-4</sup>	6,75×10 <sup>-4</sup>	5,22×10 <sup>-4</sup>	5,03×10 <sup>-4</sup>	4,52×10 <sup>-4</sup>	–
	R <sup>2</sup>	0,975	0,973	0,974	0,958	0,971	0,977	0,973	0,972	0,977	0,972	0,971	0,891
	χ <sup>2</sup>	0,002	0,002	0,002	0,005	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,008	0,003	0,0026
	REQM	0,047	0,049	0,048	0,067	0,053	0,046	0,053	0,053	0,047	0,052	0,053	0,052
Page	k (s <sup>-1</sup> )	3,80×10 <sup>-5</sup>	2,50×10 <sup>-5</sup>	2,90×10 <sup>-5</sup>	1,40×10 <sup>-5</sup>	3,30×10 <sup>-5</sup>	4,70×10 <sup>-5</sup>	7,40×10 <sup>-5</sup>	4,70×10 <sup>-5</sup>	6,40×10 <sup>-5</sup>	3,10×10 <sup>-5</sup>	3,00×10 <sup>-5</sup>	–
	n (–)	1,237	1,259	1,238	1,457	1,339	1,240	1,318	1,353	1,268	1,356	1,341	–
	R <sup>2</sup>	0,989	0,989	0,988	0,992	0,992	0,990	0,992	0,993	0,991	0,993	0,992	0,908
	χ <sup>2</sup>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,009	0,001	0,008	0,001	0,001
Henderson-Pabis	REQM	0,032	0,035	0,032	0,029	0,028	0,030	0,030	0,027	0,029	0,026	0,028	0,027
	k (s <sup>-1</sup> )	2,93×10 <sup>-4</sup>	2,42×10 <sup>-4</sup>	2,33×10 <sup>-4</sup>	5,26×10 <sup>-4</sup>	4,81×10 <sup>-4</sup>	3,55×10 <sup>-4</sup>	8,11×10 <sup>-4</sup>	7,14×10 <sup>-4</sup>	5,47×10 <sup>-4</sup>	5,09×10 <sup>-4</sup>	5,36×10 <sup>-4</sup>	–
	a (–)	1,050	1,058	1,051	1,095	1,072	1,051	1,055	1,067	1,053	1,072	1,075	–
	R <sup>2</sup>	0,978	0,977	0,977	0,967	0,976	0,980	0,976	0,977	0,979	0,976	0,977	0,888
Henderson-Pabis	χ <sup>2</sup>	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
	REQM	0,044	0,046	0,045	0,059	0,049	0,043	0,050	0,048	0,044	0,048	0,047	0,048

As taxas de secagens da EJ a  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  e diferentes temperaturas ( $50$ ;  $60$  e  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ), e potências da radiação IV ( $90$ ;  $130$  e  $170 \text{ W}$ ) estão mostradas na Figura 5 (a–b) **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O comportamento das curvas para as outras condições de temperatura e velocidade do ar de secagem foi similar aos mostrados na Figura 5 (a–b). Os resultados mostraram que as secagens com radiação IV tiveram o menor tempo de secagem em razão da maior taxa de secagem comparada com a SCE AQ. Independentemente das velocidades, temperaturas e potências da radiação IV, as taxas de secagem se mostraram maiores no início do processo de secagem evidenciadas por um breve e rápido período de taxa crescente até um valor máximo que, em seguida, diminuíram. Este comportamento também foi observado para secagem em camada de espuma para polpa de cumbeba (Diógenes et al., 2022). A taxa de secagem diminuiu em decorrência da redução da umidade da EJ à medida que a secagem procedeu (Rajkumar et al., 2007). Dehghannya et al. (2019) verificaram que houve a presença de dois períodos de taxa decrescente para secagem em camada de espuma de suco de limão, sendo que o segundo período de taxa decrescente apresentou a inclinação das curvas mais pronunciada do que o primeiro período. Assim, as secagens em camada de espuma de EJ ocorreram exclusivamente no período de taxa decrescente, o que sugere que a difusão é o mecanismo governante para o movimento da umidade na EJ. O mesmo comportamento foi observado por Cól et al. (2021) que observaram que a secagem em camada de espuma para bacaba também apresentou unicamente o período de taxa decrescente, o que indicou que a difusão foi o mecanismo governante para o movimento interno da umidade.

Figura 5 – Taxas de secagem (a) com ar aquecido e (b) infravermelho



### 3.4. Propriedades físicas dos pós da polpa de jabuticaba

Tem-se na Figura 6 (a–e) e Figura 7 (a–e) as superfícies de resposta para a temperatura da superfície, o tempo de secagem, a atividade de água, o conteúdo de antocianinas totais e a difusividade efetiva para a SCE AQ e SCE IV, respectivamente.

Figura 6 – Superfícies de resposta com ar aquecido e como resposta (a) a temperatura de superfície da espuma da polpa de jabuticaba ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) o tempo de secagem (min), (c) atividade de água ( $-$ ), (d) o conteúdo de antocianinas totais ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) e (e) a difusividade efetiva ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ )

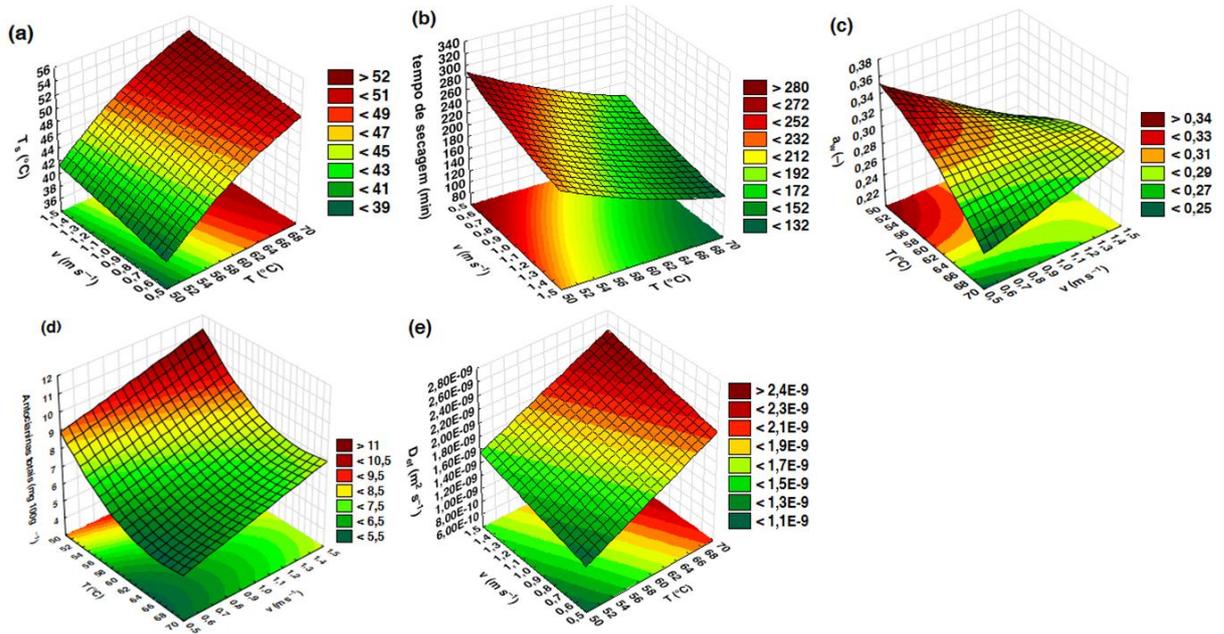
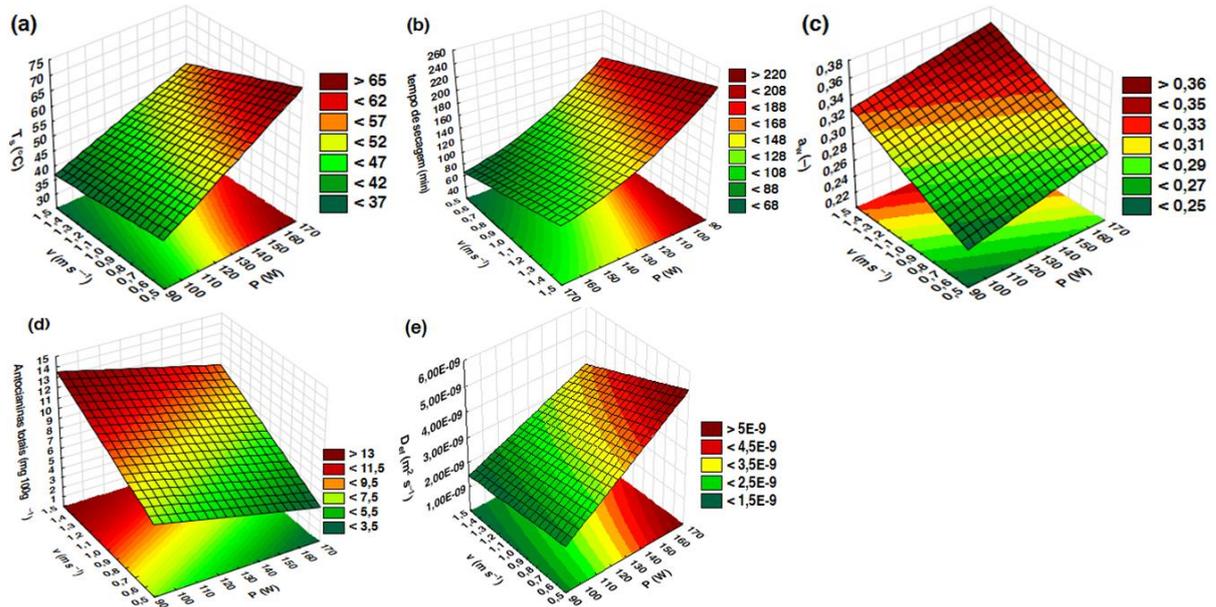


Figura 7 – Superfícies de resposta com radiação infravermelho e como resposta (a) a temperatura de superfície da espuma da polpa de jaboticaba ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) o tempo de secagem (min), (c) atividade de água ( $-$ ), (d) o conteúdo de antocianinas totais ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) e (e) a difusidade ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ )



A Tabela 9 fornece os resultados estatísticos para os fatores temperatura e velocidade do ar aquecido, e a Tabela 10 fornece os resultados estatísticos para os fatores potência da radiação infravermelho e a velocidade do ar não aquecido para os termos significativos em relação à temperatura de superfície, ao tempo de secagem, à atividade de água, à antocianinas totais e à difusidade efetiva para o pó de polpa de jaboticaba.

Tabela 9 – Efeitos da temperatura e do ar aquecido em relação à temperatura da superfície da espuma da polpa de jaboticaba e em relação ao tempo de secagem, atividade de água, antocianinas totais e da difusidade efetiva pó de polpa de jaboticaba

Fator	Efeito	Desvio padrão	p-valor	Coefficiente	Desvio padrão
Temperatura de superfície ( $R^2 = 0,993$ )					
Média	46,4	0,2	$1,0 \times 10^{-15}$	46,4	0,2
T	12,3	0,4	$9,6 \times 10^{-9}$	6,2	0,2
v	3,2	0,4	$9,6 \times 10^{-5}$	1,6	0,2
T <sup>2</sup>	1,5	0,3	$1,2 \times 10^{-3}$	0,8	0,1
Tempo de secagem ( $R^2 = 0,999$ )					
Média	200,44	0,49	$1,73 \times 10^{-12}$	200,44	0,49
T	-103,33	1,28	$5,52 \times 10^{-9}$	-51,67	0,64
v	-55,00	1,28	$1,29 \times 10^{-7}$	-27,50	0,64
T <sup>2</sup>	-8,68	0,98	$3,11 \times 10^{-4}$	-4,34	0,49
V <sup>2</sup>	-6,18	0,98	$1,50 \times 10^{-3}$	-3,09	0,49
T*v	10,00	1,57	$1,40 \times 10^{-3}$	5,00	0,78
Atividade de água ( $R^2 = 0,935$ )					
Média	0,288	0,003	$1,29 \times 10^{-10}$	0,288	0,003

T	-0,029	0,008	$1,41 \times 10^{-2}$	-0,014	0,004
v	-0,029	0,008	$1,46 \times 10^{-2}$	-0,014	0,004
T <sup>2</sup>	0,015	0,006	$4,94 \times 10^{-2}$	0,008	0,003
T*v	0,079	0,010	$2,72 \times 10^{-4}$	0,039	0,005
<b>Antocianinas totais (R<sup>2</sup> = 0,953)</b>					
Média	7,95	0,14	$1,60 \times 10^{-10}$	7,95	0,14
T	-3,34	0,38	$4,65 \times 10^{-5}$	-1,67	0,19
v	2,31	0,38	$4,76 \times 10^{-4}$	1,15	0,19
T <sup>2</sup>	-1,38	0,28	$1,65 \times 10^{-3}$	-0,69	0,14
<b>Difusidade efetiva (R<sup>2</sup> = 0,956)</b>					
Média	$1,80 \times 10^{-9}$	$2,96 \times 10^{-11}$	$5,85 \times 10^{-12}$	$1,80 \times 10^{-9}$	$2,96 \times 10^{-11}$
T	$9,56 \times 10^{-10}$	$8,02 \times 10^{-11}$	$2,25 \times 10^{-6}$	$4,78 \times 10^{-10}$	$4,01 \times 10^{-11}$
v	$4,56 \times 10^{-10}$	$8,02 \times 10^{-11}$	$4,60 \times 10^{-4}$	$2,28 \times 10^{-10}$	$4,01 \times 10^{-11}$

A temperatura e a velocidade do ar exerceram um efeito positivo na variável resposta temperatura da superfície da EJ. Observou-se que a temperatura do ar aquecido desempenhou um efeito positivo linear e quadrático significativos na temperatura da superfície, logo a superfície da EJ aumentou ao elevar a temperatura do ar de secagem de 50 para 70 °C. A velocidade do ar também exerceu um efeito positivo linear na temperatura da superfície da EJ ao aumentar de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup>. Houve o efeito combinado negativo entre a potência da radiação e a velocidade do ar não aquecido. O modelo é descrito pela Equação (31):

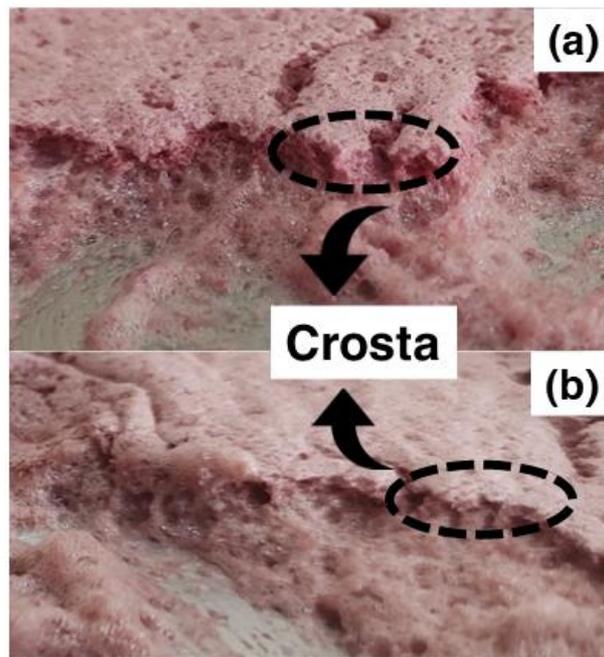
$$T_s = 46,4 + 6,2T + 0,8v + 1,6T^2 \quad (31)$$

A cinética de secagem (Figura 3 a–b) mostrou que elevar tanto a temperatura como a velocidade do ar resultou em menor tempo de secagem. Todos os termos do modelo (31) foram significativos ( $p < 0,05$ ) tendo o tempo de secagem como resposta. A temperatura e a velocidade do ar aquecido desempenham um efeito negativo significativo ao tempo de secagem, o que implicou na redução do tempo de secagem ao elevar a temperatura do ar de 50 para 70 °C e aumentar a velocidade do ar de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup>. O efeito linear negativo da temperatura do ar exerceu quase duas vezes mais influência ao processo de secagem do que o efeito negativo linear da velocidade do ar. O efeito quadrático negativo da temperatura do ar exerceu uma influência em um fator de 1,4 à secagem em relação ao efeito negativo da velocidade quadrática. Houve efeito combinado positivo da temperatura e a velocidade do ar, o que implicou aumentar o tempo de secagem se elevar a temperatura e aumentar a velocidade do ar de secagem. Este efeito pode ter resultado da formação de uma crosta sobre a EJ durante a secagem, dificultando

a remoção da umidade, conseqüentemente, estendendo o tempo de secagem como mostra a Figura (a). Borges, Borél e Lima-Corrêa (2022) inferiram que a formação da crosta sobre a superfície da espuma durante a secagem dificulta a remoção a água. O modelo é descrito pela Equação (32):

$$\begin{aligned} \text{tempo de secagem} \\ = 200,44 - 51,67T - 27,50v - 4,34T^2 - 3,09v^2 + 5,00Tv \end{aligned} \quad (32)$$

Figura 8 – Crosta formada durante a secagem em camada de espuma da polpa de jabuticaba (a) com ar aquecido a 60 °C e 1,0 m s<sup>-1</sup> e (b) radiação infravermelho a 130 W e 1,0 m s<sup>-1</sup>



A temperatura e a velocidade do ar tiveram um efeito linear negativo sobre a atividade de água e com a mesma magnitude (Tabela 9). Assim, tanto elevar a temperatura do ar de 50 para 70 °C como aumentar a velocidade do ar de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup> acarretou diminuição da atividade de água. Observou-se também o efeito combinado positivo da temperatura e velocidade do ar que, como resultado, aumentou a atividade de água do pó de polpa de jabuticaba. A atividade de água do pó de polpa de jabuticaba ter aumentado em virtude desse efeito combinado corrobora com a hipótese levantada na discussão do tempo de secagem acerca da formação da crosta ocasionar a dificuldade da remoção de umidade, logo um maior conteúdo de umidade presente no pó, o que é observado no estudo de secagem em camada de espuma de

couve por Borges, Borél e Lima-Corrêa (2022). A Figura 6 (c) mostra a superfície de resposta tendo a atividade de água como resposta. O modelo é descrito pela Equação (33):

$$a_w = 0,288 - 0,014T - 0,014v + 0,008T^2 + 0,039Tv \quad (33)$$

Como esperado, elevar a temperatura de 50 para 70 °C exerceu um efeito tanto linear quanto quadrático negativo às antocianinas totais, isto é, promoveu a degradação das antocianinas totais presentes no pó de polpa de jabuticaba. Por sua vez, aumentar a velocidade do ar de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup> apresentou um efeito linear positivo ao teor de antocianinas totais presentes no pó de polpa de jabuticaba. A Figura 6 (d) mostra a superfície de resposta tendo as antocianinas totais como resposta. O modelo é descrito pela Equação (34):

$$\text{Antocianinas totais} = 7,95 - 1,67T + 1,15v - 0,69T^2 \quad (34)$$

Elevar a temperatura de 50 para 70 °C e a velocidade do ar de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup> ocasionaram um efeito linear positivo à difusidade efetiva, ou seja, o valor da difusidade efetiva aumentou. O aumento do valor da difusão efetiva com o aumento da temperatura pode advir das moléculas de água estarem ligadas ao alimento mais fracamente em temperaturas mais altas (50–70 °C) (Lisboa et al., 2019). Silva et al. (2009) relataram que elevar tanto a temperatura como a velocidade do ar de secagem favorece a transferência de massa, portanto, aumenta-se o valor da difusidade efetiva. Gomes et al. (2022) também observaram que elevar a temperatura de 50 para 70 °C ocasionou o aumento da difusão efetiva, assim como a difusão efetiva mostrou uma tendência linear de aumento com o aumento temperatura para a secagem em camada de espuma de jambu. O modelo é descrito pela Equação (35):

$$D_{ef} = 1,80 \times 10^{-9} + 4,78 \times 10^{-10}T + 2,28 \times 10^{-10}v \quad (35)$$

Tabela 10 – Efeitos da potência da radiação infravermelho e velocidade do ar não aquecido em relação à temperatura da superfície da espuma da polpa de jabuticaba e em relação ao tempo de secagem, atividade de água, antocianinas totais e difusidade efetiva do pó de polpa de jabuticaba

Fator	Efeito	Desvio padrão	p-valor	Coefficiente	Desvio padrão
Temperatura da superfície ( $R^2 = 0,977$ )					
Média	50,8	0,5	$4,5 \times 10^{-12}$	50,8	0,5
P	23,6	1,5	$9,6 \times 10^{-7}$	11,8	0,7
v	-9,6	1,5	$3,5 \times 10^{-4}$	-4,8	0,7
P*v	-5,0	1,8	$3,0 \times 10^{-2}$	-2,5	0,9
Tempo de secagem ( $R^2 = 0,989$ )					
Média	143,11	1,97	$2,48 \times 10^{-11}$	143,11	1,97
P	-118,33	5,19	$7,88 \times 10^{-8}$	-59,17	2,59
v	48,33	5,19	$3,40 \times 10^{-5}$	24,17	2,59
P <sup>2</sup>	-18,17	3,85	$2,15 \times 10^{-3}$	-9,08	1,92
Atividade de água ( $R^2 = 0,845$ )					
Média	0,304	0,005	$4,23 \times 10^{-12}$	0,304	0,005
P	0,038	0,013	$1,98 \times 10^{-2}$	0,019	0,006
v	0,077	0,013	$3,54 \times 10^{-4}$	0,038	0,006
Antocianinas totais ( $R^2 = 0,855$ )					
Média	8,49	0,40	$2,44 \times 10^{-8}$	8,49	0,40
P	-3,70	1,08	$8,86 \times 10^{-3}$	-1,85	0,54
v	6,40	1,08	$3,44 \times 10^{-4}$	3,20	0,54
Difusidade efetiva ( $R^2 = 0,973$ )					
Média	$3,07 \times 10^{-9}$	$7,07 \times 10^{-11}$	$8,98 \times 10^{-10}$	$3,07 \times 10^{-9}$	$7,07 \times 10^{-11}$
P	$2,83 \times 10^{-9}$	$1,91 \times 10^{-10}$	$1,56 \times 10^{-6}$	$1,41 \times 10^{-9}$	$9,57 \times 10^{-11}$
v	$-1,03 \times 10^{-9}$	$1,91 \times 10^{-10}$	$1,05 \times 10^{-3}$	$-5,13 \times 10^{-10}$	$9,57 \times 10^{-11}$
P*v	$-6,50 \times 10^{-10}$	$2,34 \times 10^{-10}$	$2,76 \times 10^{-2}$	$-3,25 \times 10^{-10}$	$1,17 \times 10^{-10}$

A potência da radiação IV desempenhou um efeito linear positivo na temperatura da superfície de EJ. Como resultado, aumentar a potência da radiação IV de 90 para 170 W promoveu o aumento de  $T_s$ . Em contraste, a velocidade do ar exerceu um efeito negativo, o que implicou diminuição da  $T_s$  ao aumentar a velocidade do ar de 0,5 para 1,5  $m s^{-1}$ , mostrando um arrefecimento da superfície da EJ. O modelo é descrito pela Equação (36):

$$T_s = 50,8 + 11,8P - 4,8v - 2,5Pv \quad (36)$$

Como esperado, ao elevar a potência da radiação IV de 90 para 170 W ocasionou um efeito linear e quadrático negativo no tempo de secagem, ou seja, diminuiu o tempo de secagem. A velocidade do ar não aquecido teve um efeito positivo no tempo de secagem que, ao ser aumentado de 0,5 para 1,5  $m s^{-1}$ , aumentou o tempo de secagem. O efeito linear da potência da

radiação IV apresentou uma magnitude mais que duas vezes maior que o efeito linear da velocidade do ar ao avaliar o tempo de secagem. O presente comportamento está em concordância com a cinética de secagem (Figura 4 b). A Figura 7 (b) mostra a superfície de resposta tendo o tempo de secagem como resposta. O modelo é descrito pela Equação (37):

$$\text{tempo de secagem} = 143,11 - 59,17P + 24,17v - 9,08P^2 \quad (37)$$

Como mostrado na Tabela 10, tanto a potência da radiação IV como a velocidade do ar não aquecido tiveram um efeito positivo na atividade de água do pó de polpa de jabuticaba, com o efeito da velocidade do ar não aquecido sendo o dobro do efeito ocasionado pela potência. Elevar a potência da radiação IV de 90 para 170 W e aumentar a velocidade do ar não aquecido de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup> pode ter favorecido a formação da crosta (Figura 8 (b)), dificultando a remoção da umidade. A Figura 7 (c) mostra a superfície de resposta tendo a atividade de água como resposta. O modelo é descrito pela Equação (38):

$$a_w = 0,304 + 0,019T + 0,038v \quad (38)$$

Em relação às antocianinas totais, a potência da radiação IV desempenhou um efeito linear negativo, portanto, implicou na diminuição do teor de antocianinas presentes no pó de polpa de jabuticaba ao elevar a potência de 90 para 170 W. Em contrapartida, a velocidade do ar não aquecido surtiu um efeito linear positivo ao aumentar a temperatura de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup>, com a magnitude de mais de 1,7 em contraste com o efeito desempenha pela potência da radiação IV. O modelo é descrito pela Equação (39):

$$\text{Antocianinas totais} = 8,49 - 1,85P + 3,20v \quad (39)$$

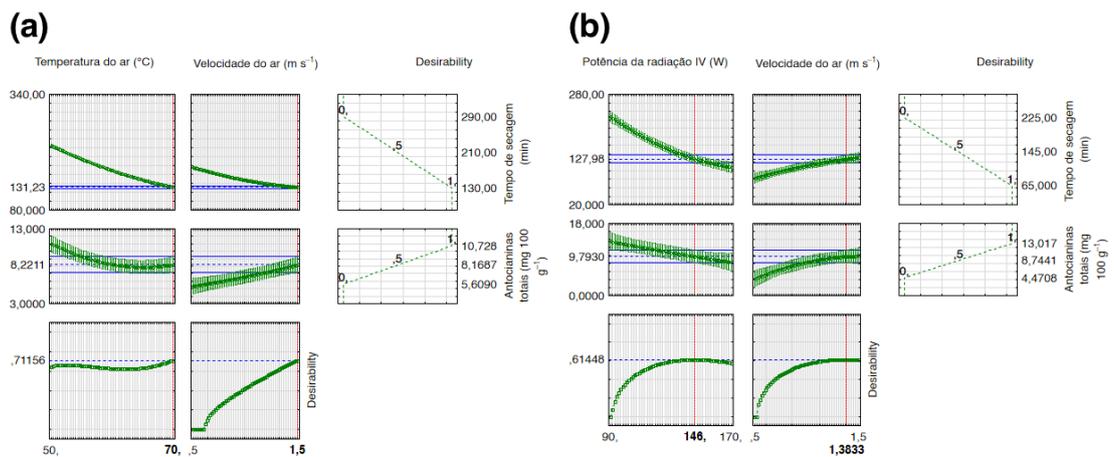
Elevar a potência da radiação IV de 90 para 170 W apresentou um efeito linear positivo na difusividade efetiva, ou seja, a difusividade efetiva teve seu valor aumentado. Em contrapartida, aumentar a velocidade de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup> surtiu um efeito negativo à difusividade efetiva, resultando na sua diminuição. Houve o efeito combinado negativo entre a potência da radiação

IV e a velocidade do ar não aquecido sobre a difusividade efetiva, o que implicou em ter seu valor reduzido ao elevar ambos os fatores dos níveis  $-1$  para o  $+1$ . Aumentar a potência da radiação IV implica em mais energia absorvida na superfície do material, por conseguinte, a difusividade efetiva (Fernando et al., 2011). Além disso, relata-se na literatura que aumentar a intensidade da radiação ocasiona o aumento da temperatura interna no material submetido à secagem por radiação, como resultado, a difusividade efetiva aumenta (Botelho et al., 2011). A velocidade do ar não aquecido bem como o efeito combinado diminuíram o valor da difusividade efetiva possivelmente pelo resfriamento da superfície da EJ, que reduz a taxa de secagem, consequentemente, a difusividade efetiva. O modelo é descrito pela Equação (40):

$$D_{ef} = 3,07 \times 10^{-9} + 1,41 \times 10^{-9}P - 5,13 \times 10^{-10}v - 3,25 \times 10^{-10}Pv \quad (40)$$

Diante dos resultados obtidos, selecionou-se a melhor condição operacional para a SCE, utilizando a abordagem da função desejabilidade, com base no tempo de secagem e antocianinas totais, visando a comercialização do SJ. O objetivo para a resposta da função desejabilidade foi alcançar concomitantemente o menor tempo de secagem a fim de minimizar os gastos energéticos atrelados ao processamento, como aumentar a retenção das antocianinas totais no SJ. Os resultados são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Função desejabilidade para o tempo de secagem e antocianinas totais para a secagem em camada de espuma (a) com ar aquecido e (b) radiação infravermelho



Para a SCE AQ, a condição ótima obtida foi a temperatura do ar a 70 °C e a velocidade do ar a 1,5 m s<sup>-1</sup>, cuja desejabilidade global foi igual a 0,712. Esse valor é considerado bom na escala da desejabilidade, que infere ao produto uma qualidade aceitável e que há uma melhoria

em relação ao produto disponível comercialmente (Tabela 3). Como discorrido anteriormente, o efeito positivo da velocidade do ar minimizou a degradação das antocianinas totais ao elevar a velocidade do ar de 0,5 para 1,5 m s<sup>-1</sup>. Para a SCE IV, a condição ótima obtida foi a 146 W e 1,38 m s<sup>-1</sup>, com a desejabilidade global de 0,614. Esse valor é considerado satisfatório, isto é, aceitável, porém requer melhorias (Tabela 3). A condição operacional mais próxima da ideal é 130 W e 1,5 m s<sup>-1</sup>.

A Tabela 11 mostra os valores para densidade bulk, tapped e de partícula, porosidade, índice de Carr, razão de Hausner, índice de escurecimento e branqueamento e a diferença total de cores para o pó de polpa de jabuticaba obtido tanto pela SCE AQ quanto pela SCE IV.

Tabela 11 – Propriedades físicas do pó da polpa de jabuticaba obtido

SCE	$\rho_{\text{bulk}} [\text{kg m}^{-3}]$	$\rho_{\text{tapped}} [\text{kg m}^{-3}]$	$\rho_{\text{partícula}} [\text{kg m}^{-3}]$	$\varphi(\%)$	IC (%)	RH (-)	IE (%)	IB (%)	$\Delta E (-)$
AQ	192,99 ±15,31 <sup>a</sup>	251,57 ±14,95 <sup>a</sup>	1187,14 ±141,72 <sup>b</sup>	78,51±2,86 <sup>b</sup>	23,33±2,22 <sup>a</sup>	1,31 ± 0,04 <sup>a</sup>	92,17±0,13 <sup>a</sup>	21,66±2,71 <sup>a</sup>	36,43 ±1,91 <sup>a</sup>
IV	165,10 ±12,49 <sup>b</sup>	218,60 ±15,72 <sup>b</sup>	1772,95±545,23 <sup>a</sup>	86,55±4,08 <sup>a</sup>	24,43±2,67 <sup>a</sup>	1,33±0,05 <sup>a</sup>	92,09±0,16 <sup>a</sup>	21,22±2,79 <sup>a</sup>	32,72 ±4,29 <sup>b</sup>

Valores expressos como a média ± desvio padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) de acordo com o teste t de Student.

Houve diferença estatística ( $p \leq 0,05$ ) entre o pó de polpa de jabuticaba obtido pela SCE AQ e pela SCE IV em relação as densidades bulk, tapped e de partícula, porosidade e diferença total de cores. Observou-se, (Tabela 11), que o pó obtido pela SCE AQ apresentou a densidade bulk maior ( $192,990 \text{ kg m}^{-3}$ ) comparado ao pó obtido pela SCE IV ( $165,100 \text{ kg m}^{-3}$ ). O menor valor de densidade bulk indica que há mais espaços ocupado por ar nas partículas Ng e Sulaiman (2018). Valores mais baixos da densidade bulk podem estar associados ao elevado conteúdo de carboidratos (Mohamed et al., 2022). Além disto, o maior valor para densidade bulk sugere que o pó obtido pela SCE AQ apresentou uma maior encolhimento do que o pó obtido pela SCE IV (Farid et al., 2022). A secagem em camada de espuma assistida por micro-ondas ocasiona a redução da densidade bulk porque o ar fica retido na espuma pela solidificação da estrutura da espuma. Como resultado, a densidade bulk do pó obtida pela secagem auxiliada com micro-ondas é menor do que a densidade bulk do pó obtido pela secagem a ar quente (Varhan et al., 2019). Assim, pode-se inferir que o ar não aquecido auxiliou na solidificação da estrutura da espuma no caso da secagem com radiação IV, resultando no menor valor de densidade bulk para o pó comparado com o valor da densidade bulk obtida pela secagem com ar quente. O pó obtido pela SCE AQ teve maior valor ( $192,990 \text{ kg m}^{-3}$ ) comparado com os valores encontrados por Borges, Borél e Lima-Corrêa (2022) ( $129\text{--}167 \text{ kg m}^{-3}$ ), enquanto o pó obtido pela SCE IV encontra-se dentro desta faixa ( $165,10 \text{ kg m}^{-3}$ ). A densidade tapped para a secagem com ar aquecido ( $251,567 \text{ kg m}^{-3}$ ) foi maior ( $p \leq 0,05$ ) do que a densidade tapped do pó de polpa de jabuticaba obtido pela SCE IV ( $218,60 \text{ kg m}^{-3}$ ). A densidade de partícula do pó da polpa de jabuticaba obtido pela SCE IV ( $1772,95 \text{ kg m}^{-3}$ ) diferiu significativamente ( $p \leq 0,05$ ) do pó da polpa de jabuticaba obtido pela SCE AQ ( $1187,145 \text{ kg m}^{-3}$ ). O valor para a densidade de partícula ( $1187,15 \text{ kg m}^{-3}$ ) do pó de polpa de jabuticaba foi menor do que a faixa de valores de densidade de partícula encontrados para pó de figo secado com ar quente ( $1350\text{--}1600 \text{ kg m}^{-3}$ ), enquanto se mostrou dentro da faixa ( $1340\text{--}1790 \text{ kg m}^{-3}$ ) para a secagem com micro-ondas com base no estudo realizado por Varhan et al. (2019). O pó obtido pela SCE IV apresentou maior valor de porosidade (86,55%) em relação ao pó obtido pela SCE AQ (78,51%). Como a porosidade é inversamente proporcional à densidade bulk, o baixo valor para a densidade bulk ( $< 200 \text{ kg.m}^{-3}$ ) era um indicativo para a elevada porosidade do SJ. Os pós da polpa de jabuticaba apresentaram elevada porosidade para ambos os métodos de secagem, visto que os valores estão próximos do valor (81,9%) considerado por Franco et al. (2015) como porosidade alta para pó obtido por secagem em camada de espuma.

Não houve diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre o pó da polpa de jabuticaba obtido pela SCE AQ e pela SCE IV em relação à capacidade de escoamento (Tabela 11). A capacidade de escoamento do pó de polpa de jabuticaba foi expressa em termos do índice de Carr e da razão de Hausner. Ambos os pós mostraram uma fluidez razoável ( $IC (\%)_{SCE\ AQ} = 23,33$ ;  $IC (\%)_{SCE\ IV} = 24,43$ ) e coesão razoável ( $RH (-)_{SCE\ AQ} = 1,31$ ;  $RH (-)_{SCE\ IV} = 1,33$ ). Como a densidade tapped ( $218,596\text{ kg m}^{-3}$ ) do pó de polpa de jabuticaba é 32% maior do que densidade bulk ( $165,100\text{ kg m}^{-3}$ ), e RH é diretamente proporcional à densidade tapped, ocasionou o aumento de RH, implicando na redução da propriedade de escoamento do pó. Raciocínio análogo para o pó obtido com a secagem com ar aquecido. Li et al. (2021) observaram que aumentar a concentração de goma arábica para a elaboração da espuma de melão cantaloupe reduziu a densidade bulk, aumentou a densidade tapped, conseqüentemente, diminuiu tanto a coesividade (RH) e como a fluidez (IC) do pó, conferindo ao pó obtido excelentes propriedades de escoamento.

Não houve diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) para o pó da polpa de jabuticaba entre as secagens ao analisar o IE. O IE mostrou-se acima de 90,0% para ambas as secagens, portanto, elevado o que significa que houve menor grau de escurecimento. Abbasi e Azizpour (2016) relataram que concentrações elevadas de albumina de ovo aumentou o índice de escurecimento para o pó de ginja produzido por secagem em camada de espuma. Os aminoácidos presentes na albumina do ovo podem desencadear a reação de Maillard e, assim sendo, aumentar o escurecimento do pó. O IB para os SJ não diferiu significativamente ( $p > 0,05$ ) quanto aos métodos de secagem em camada de espuma aplicados. Borges, Borél e Lima-Corrêa (2022) observaram uma média de 42,20 para o IB para o pó de polpa de couve. A SCE AQ mostrou uma tendência de causar uma maior diferença total ao SJ em relação à PJ do que a SCE IV, porém não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre as secagens. A diferença total de ambas as secagens foi maior do que 30. É desejável baixos valores para a diferença total de cor, porquanto é um indicativo da estabilidade da cor do pó comparado com a polpa (Darniadi et al., 2020). Para outros pós alimentícios, foi reportado que a diferença total de cor variou entre 41 e 61 para pó de yacon seco em camada de espuma Franco et al. (2016); e 76,35 e 78,24 para pó de mirtilo seco em camada de espuma assistido por liofilização Darniadi et al. (2020).

## 4 CONCLUSÕES

O estudo de caracterização da polpa de jabuticaba (PJ) e da espuma da polpa de jabuticaba (EJ) mostrou que houve redução da umidade e da atividade de água da EJ em relação à PJ, bem como entre os parâmetros cromáticos, exceto para a coordenada cromática  $b^*$ . A densidade da EJ se apresentou dentro da faixa para a aplicação do processo de secagem em camada de espuma (SCE). Além disso, a EJ expandiu em um valor de 57,68%. O tempo de secagem para a SCE AQ e para a SCE IV variou entre 130 e 290 min; e 65–225 min, respectivamente. Verificou-se que, dentre os modelos estudados, o modelo de Page foi o mais apropriado para descrever ambas as secagens. A taxa de secagem foi maior para a SCE IV em relação à SCE AQ. Dentre os tratamentos, o SJ obtido com o ar a 50 °C e 0,5 m s<sup>-1</sup> apresentou menor degradação do conteúdo de antocianinas totais, enquanto a menor degradação das antocianinas foi observada a 170 W e 0,5 m s<sup>-1</sup> para a SCE IV que forneceu uma  $D_{ef}$  maior em comparação com as outras condições operacionais de SCE IV. o maior valor para a  $D_{ef}$  ocorreu a 70 °C e 1,5 m s<sup>-1</sup> no caso da SCE AQ. A condição operacional ótima de secagem visando alcançar concomitantemente o menor tempo de secagem e a maior retenção de antocianinas totais foi a 70 °C e 1,5 m s<sup>-1</sup> para a SCE AQ e 146 W e 1,38 m s<sup>-1</sup> para a SCE IV. As análises nos SJ mostraram que densidades bulk e tapped e a diferença total de cor foram maiores para a SCE AQ, enquanto a densidade de partícula e a porosidade foram maiores para a SCE IV. Não houve diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ) para o índice de Carr, razão de Hausner, índice de escurecimento e índice de brancura para ambas as secagens. Diante do observado, tem-se que a SCE AQ se mostrou mais aplicável em termos da desejabilidade e diferença total de cor, com a condição ótima de 70 °C e 1,5 m s<sup>-1</sup>, enquanto a SCE IV mostrou-se mais aplicável em termos do tempo de secagem reduzido e diferença total de cor menor para o SJ.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

A fim de caracterizar mais amplamente os SJ obtidos pelas SCE AQ e IV, é recomendado efetuar as análises de higroscopicidade, solubilidade, reidratação, granulometria e atividade antioxidante para os SJ.

## **5 AGRADecIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**REFERÊNCIAS**

- Abbasi, E., & Azizpour, M. (2016). Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. *LWT - Food Science and Technology*, *68*, 105–110. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.12.004>
- Adak, N., Heybeli, N., & Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, *219*, 109–116. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2016.09.103>
- Aktas, R. N., & Tontul, I. (2021, janeiro 30). Usability of soapwort and horse chestnut saponin extracts as foaming agents in foam mat drying of pomegranate juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(2), 786–793. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10770>
- AOAC. (2010). *Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists* (W. Horwitz & G. W. Latimer, Orgs.; 18<sup>o</sup> ed). AOAC International.
- Azizpour, M., Mohebbi, M., & Khodaparast, M. H. H. (2016). Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *34*, 122–126. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2016.01.002>
- Barcia, M. T., Pertuzatti, P. B., Jacques, A. C., Godoy, H. T., & Zambiasi, R. (2012). Bioactive compounds, antioxidant activity and percent composition of jambolão fruits (*Syzygium cumini*). *The Natural Products Journal*, *2*(2), 129–138. <https://doi.org/10.2174/2210315511202020129>
- Borges, H. M. A., Borél, L. D. M. S., & Lima-Corrêa, R. A. B. (2022). Effects of temperature and foam layer thickness on collard greens powder production by foam mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.1111/JFPP.16755>
- Botelho, F. M., Corrêa, P. C., Goneli, A. L. D., Martins, M. A., Magalhães, F. E. A., & Campos, S. C. (2011). Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *15*(8), 845–852. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800012>
- Brar, A. S., Kaur, P., Kaur, G., Subramanian, J., Kumar, D., & Singh, A. (2020, setembro 21). Optimization of process parameters for foam-mat drying of peaches.

- International Journal of Fruit Science*, 20(S3), S1495–S1518.  
<https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1812017>
- Bruce, D. M. (1985, dezembro 1). Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150°C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(4), 337–348.  
[https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90098-8)
- Chaves, M. A., Barreto, I. M. A., Reis, R. C., & Kadam, D. M. (2013). Physicochemical and sensory properties of purple Brazilian cherry (*Eugenia uniflora*, L.) foams. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(8), 1688–1697.  
<https://doi.org/10.1111/IJFS.12139>
- Cól, C. D. de, Tischer, B., Flôres, S. H., & Rech, R. (2021). Foam-mat drying of bacaba (*Oenocarpus bacaba*): Process characterization, physicochemical properties, and antioxidant activity. *Food and Bioproducts Processing*, 126, 23–31.  
<https://doi.org/10.1016/J.FBP.2020.12.004>
- Costa, A. G. v., Garcia-Diaz, D. F., Jimenez, P., & Silva, P. I. (2013). Bioactive compounds and health benefits of exotic tropical red–black berries. *Journal of Functional Foods*, 5(2), 539–549. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2013.01.029>
- Darniadi, S., Ifie, I., Luna, P., Ho, P., & Murray, B. S. (2020). Foam-mat freeze-drying of blueberry juice by using trehalose- $\beta$ -lactoglobulin and trehalose-bovine serum albumin as matrices. *Food and Bioprocess Technology*, 13(6), 988–997.  
<https://doi.org/10.1007/S11947-020-02445-6/FIGURES/7>
- Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2018, abril 1). Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: experimental and numerical investigation. *Powder Technology*, 328, 470–484. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.034>
- Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2019, janeiro 1). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: impact of convective hot air temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 135, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023>
- Derringer, G., & Suich, R. (2018). Simultaneous optimization of several response variables. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>, 12(4), 214–219.  
<https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>

- Diógenes, A. de M. G., Figueirêdo, R. M. F. de, Queiroz, A. J. de M., Ferreira, J. P. de L., Silva, W. P. da, Gomes, J. P., Santos, F. S. dos, Castro, D. S. de, Oliveira, M. N. de, Santos, D. da C., Andrade, R. O. de, & Lima, An. R. C. de. (2022). Mathematical models to describe the foam mat drying process of cumbeba pulp (*Tacinga inamoena*) and product quality. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 1751, 11(12), 1751. <https://doi.org/10.3390/FOODS11121751>
- Farid, E., Mounir, S., Talaat, E., Elnemr, S., & Siliha, H. (2022). Effect of foaming parameters on the physical and phytochemical properties of tomato powder. *Food Science and Biotechnology*, 31, 1423–1431. <https://doi.org/10.1007/S10068-022-01125-9>
- Fernandes, F. A. N., Fonteles, T. v., Rodrigues, S., Brito, E. S. de, & Tiwari, B. K. (2020). Ultrasound-assisted extraction of anthocyanins and phenolics from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel: kinetics and mathematical modeling. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 2321. <https://doi.org/10.1007/S13197-020-04270-3>
- Fernando, W. J. N., Low, H. C., & Ahmad, A. L. (2011). The effect of infrared on diffusion coefficients and activation energies in convective drying: A case study for banana, cassava and pumpkin. *Journal of Applied Sciences*, 11(21), 3635–3639. <https://doi.org/10.3923/JAS.2011.3635.3639>
- Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. de S. N., & Masson, M. L. (2015, agosto 1). Foam mat drying of yacon juice: experimental analysis and computer simulation. *Journal of Food Engineering*, 158, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.02.030>
- Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. N., & Masson, M. L. (2016). Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 503–513. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.11.009>
- Furtado, T. D. i R., Muniz, J. A., Silva, E. M., & Fernandes, J. G. (2019). Drying kinetics of jabuticaba pulp by regression models. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(1). <https://doi.org/10.1590/0100-29452019097>
- Gomes, F. P., Resende, O., Sousa, E. P. de, Célia, J. A., & Oliveira, K. B. de. (2022). Application of mathematical models and thermodynamic properties in the drying of

- jambu leaves. *Agriculture* 2022, Vol. 12, Page 1252, 12(8), 1252. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12081252>
- Gong, C., Liao, M., Zhang, H., Xu, Y., Miao, Y., & Jiao, S. (2020). Investigation of hot air-assisted radio frequency as a final-stage drying of pre-dried carrot cubes. *Food and Bioprocess Technology*, 13, :419-429. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02400-0>
- Gupta, V., Prabhakar, P. K., Gharde, S., Nimbaria, A., Sharma, V., & Rawat, A. (2021). Foam Mat Drying of Jujube (*Ziziphus mauritiana*) Juice: Process Optimisation, Physico-Functional, Phenolic Content and Antioxidant Analysis. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(4), 1013–1025. <https://doi.org/10.1007/S40030-021-00566-5/TABLES/6>
- Henderson, S. M., & S. Pabis. (1961). Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 169–174.
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., & Sunden, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 765–777. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.02.039>
- Inada, K. O. P., Nunes, S., Martínez-Blázquez, J. A., Tomás-Barberán, F. A., Perrone, D., & Monteiro, M. (2020). Effect of high hydrostatic pressure and drying methods on phenolic compounds profile of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel and seed. *Food Chemistry*, 309, 125794. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125794>
- Karim, A. A., & Wai, C. C. (1999, maio 1). Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 13(3), 203–210. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(98\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(98)00086-1)
- Kayran, S., & Doymaz, I. (2019). Infrared drying of apricot pomace. *Latin American Applied Research - An International Journal*, 49(4), 213–218. <https://doi.org/10.52292/J.LAAR.2019.199>
- Khodifad, B. C., & Kumar, N. (2019). *Foaming properties of custard apple pulp and mathematical modelling of foam mat drying*. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04082-0>

- Koç, G. Ç., & Yüksel, A. N. (2020). Foam-mat convective and microwave dried avocado powder — physical, functional, and powder properties. Em *Latin American Applied Research* (Vol. 50, Issue 9).
- Koç, G. C., & Yüksel, A. N. (2020). Foam-mat convective and microwave dried avocado powder: physical, functional, and powder properties. *Latin American Applied Research*, 50(9), 291–297.
- Lazic, R. Z. (2004). *Design of experiments in chemical engineering – a practical guide* (R. Z. Lazic, Org.). Wiley-VCH.
- Lees, D. H., & Francis, F. J. (1972). Standardization of pigment analyses in cranberries. *HortScience*, 7(1), 83–84. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.7.1.83>
- Lenquiste, S. A., Lamas, C. de A., Marineli, R. da S., Moraes, É. A., Borck, P. C., Camargo, R. L., Quitete, V. H. A. C., Carneiro, E. M., & Maróstica Junior, M. R. (2019). Jaboticaba peel powder and jaboticaba peel aqueous extract reduces obesity, insulin resistance and hepatic fat accumulation in rats. *Food Research International*, 120, 880–887. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.11.053>
- Li, T. S., Sulaiman, R., Rukayadi, Y., & Ramli, S. (2021, julho 1). Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe. *Food Hydrocolloids*, 116, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106492>
- Lisboa, H. M., Araujo, H., Paiva, G., Oriente, S., Pasquali, M., Duarte, M. E., & Mata, M. E. R. M. C. (2019). Determination of characteristic properties of mulatto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during convective drying. *Journal of Agriculture and Food Research*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2019.100003>
- Lobo, F. A., Nascimento, M. A., Domingues, R., Falcão, De. Q., Hernanz, D., Heredia, F. J., & Araujo, K. G. de L. (2016). *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*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.080>
- Majumder, P., Sinha, A., Gupta, R., & Sablani, S. S. (2021). Drying of selected major spices: characteristics and influencing parameters, drying technologies, quality retention and energy saving, and mathematical models. *Food and Bioprocess*

*Technology*, 14(6), 1028–1054. <https://doi.org/10.1007/S11947-021-02646-7/TABLES/4>

- Mohamed, A. A., Ismail-Fitry, M. R., Rozzamri, A., & Bakar, J. (2022). Effect of foam-mat drying on kinetics and physical properties of Japanese threadfin bream (*Nemipterus japonicus*) powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(3), e16376. <https://doi.org/10.1111/JFPP.16376>
- Ng, M. L., & Sulaiman, R. (2018, fevereiro 1). Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *LWT - Food Science And Technology*, 88, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.032>
- Nunes, G., Nascimento, B. S., & Lima-Corrêa, R. A. B. (2022). Development of carrot top powders using foam mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(4). <https://doi.org/10.1111/JFPP.16487>
- Osama, K., Younis, K., Qadri, O. S., Parveen, S., & Siddiqui, M. H. (2022). Development of under-utilized kadam (*Neolamarkia cadamba*) powder using foam mat drying. *LWT*, 154, 112782. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112782>
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer*. Purdue University.
- Panato, K., & Muller, C. M. O. (2022a). Drying kinetics and physicochemical and technological properties of pumpkin purée flour dried by convective and foam-mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(2), e16264. <https://doi.org/10.1111/JFPP.16264>
- Panato, K., & Muller, C.M. O. (2022b). Drying kinetics and physicochemical and technological properties of pumpkin purée flour dried by convective and foam-mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(2), e16264. <https://doi.org/10.1111/JFPP.16264>
- Qadri, O. S. (2022). Microwave drying of foamed tomato pulp: optimization and mass transfer modelling. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(9), e15954. <https://doi.org/10.1111/JFPP.15954>
- Qadri, O. S., Osama, K., & Srivastava, A. K. (2020, junho 24). Foam mat drying of papaya using microwaves: machine learning modeling. *Journal of Food Process Engineering*, 43(6). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13394>

- Qadri, O. S., Srivastava, A. K., & Yousuf, B. (2020, maio 30). Trends in foam mat drying of foods: special emphasis on hybrid foam mat drying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1667–1676. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1588221>
- Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., & Raghavan, G. S. v. (2007). Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1452–1459. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2006.04.027>
- Reis, F. R., Moraes, A. C. S. de, & Masson, M. L. (2021). Impact of foam-mat drying on plant-based foods bioactive compounds: a review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76(2), 153–160. <https://doi.org/10.1007/S11130-021-00899-3/FIGURES/2>
- Samyori, D., Deka, S. C., & Das, A. B. (2021). Physicochemical and phytochemical properties of foam mat dried passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) powder and comparison with fruit pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 787–796. <https://doi.org/10.1007/S13197-020-04596-Y/TABLES/3>
- Santos, M. C. P. dos, Cavalcanti, E. d'A. C., Santos, M. C. B., Seljan, M. P., Cameron, L. C., Ferreira, M. S. L., & Gonçalves, É. C. B. de A. (2021). Profile of phenolic compounds in jabuticaba (*Myrciaria* sp.) a potential functional ingredient. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1868459>, 36(14), 3717–3720. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1868459>
- Sauter, E. A., & Montoure, J. E. (1972, novembro 1). The relationship of lysozyme content of egg white to volume and stability of foams. *Journal of Food Science*, 37(6), 918–920. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1972.tb03703.x>
- Shaari, N. A., Sulaiman, R., Rahman, R. A., & Bakar, J. (2018). Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13467. <https://doi.org/10.1111/JFPP.13467>
- Silva, C. K. F. da, Silva, Z. E. da, & Mariani, V. C. (2009). Determination of the diffusion coefficient of dry mushrooms using the inverse method. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2009.04.009>
- Sørensen, H. (1978). *Analytical methods for dry milk products* (4<sup>o</sup> ed). Niro Atomizer.

- Sritongtae, B., Morgan, M. R. A., & Duangmal, K. (2017). Drying kinetics, physico-chemical properties, antioxidant activity and phenolic composition of foam-mat dried germinated rice bean (*Vigna umbellata*) hydrolysate. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(7), 1710–1721. <https://doi.org/10.1111/IJFS.13401>
- Tan, S. L., & Sulaiman, R. (2020, janeiro 2). Color and rehydration characteristics of natural red colorant of foam mat dried *Hibiscus sabdariffa* L. powder. *International Journal of Fruit Science*, 20(1), 89–105. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1605557>
- Tan, Si., Miao, Y., Zhou, C., Luo, Y., Lin, Z., Xie, R., & Li, W. (2022). Effects of hot air drying on drying kinetics and anthocyanin degradation of blood-flesh peach. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 1596, 11(11), 1596. <https://doi.org/10.3390/FOODS11111596>
- Tavares, I. M. de C., Castilhos, M. B. M. de, Mauro, M. A., Ramos, A. M., Souza, R. T. de, Gómez-Alonso, S., Gomes, E., Da-Silva, R., Hermosín-Gutiérrez, I., & Lago-Vanzela, E. S. (2019). *BRS Violeta (BRS Rúbea × IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying. Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity.* <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124971>
- Tekgül, Y. (2021). Optimization of foaming process – drying behaviour, physicochemical, and powder properties of hot air-assisted foam-mat dried nectarine. *International Journal of Food Engineering*, 17(10), 815–826. <https://doi.org/10.1515/IJFE-2021-0134/PDF>
- van Arsdel, W. B., & Copley, M. J. (1964). *Food dehydration* (W. B. ; van Arsdel.; & M. J. Copley, Orgs.; 1<sup>o</sup> ed). he Avi Publishing Company.
- Varhan, E., Feyza, |, & Mehmet Koç, E. |. (2019). *Foam mat drying of fig fruit: Optimization of foam composition and physicochemical properties of fig powder.* <https://doi.org/10.1111/jfpe.13022>
- Watharkar, R. B., Chakraborty, S., Srivastav, P. P., & Srivastava, B. (2021). Foaming and foam mat drying characteristics of ripe banana [*Musa balbisiana* (BB)] pulp. *Journal of Food Process Engineering*, 44(8), e13726. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13726>

- Yüksel, A. N. (2021). Development of yoghurt powder using microwave-assisted foam-mat drying. *Journal of Food Science and Technology*, 58(7), 2834–2841. <https://doi.org/10.1007/S13197-021-05035-2/TABLES/3>
- Zayas, J. F. (1997). Functionality of proteins in food. Em *Functionality of Proteins in Food*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59116-7>