

CINÉTICA DE SECAGEM DA BERINJELA (*SOLANUM MELONGENA* L.) EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO DE AR

Jéssica Raiane Barbosa da Silva ¹
Ana Regina Nascimento Campos ²

RESUMO

A berinjela (*Solanum melongena* L.) é muito benéfica para à saúde humana, mas este fruto tem uma vida útil curta, ocasionando uma limitação no seu comércio como um produto fresco, sendo necessária a investigação de métodos de processamento que conservem suas propriedades por mais tempo. Portanto, objetivou-se estudar a cinética de secagem da berinjela em estufa com corrente de ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais. As cinéticas de secagem foram determinadas pesando-se as amostras em intervalos regulares, até que a massa permanecesse constante. Com os dados da secagem, foram determinados os valores da razão do teor de água e, posteriormente, os dados foram aplicados a diferentes modelos matemáticos. O modelo de Wang e Sing foi o que melhor representou os dados experimentais para as três temperaturas escolhidas, apresentando os maiores valores de coeficiente de determinação e os menores valores de desvio quadrático médio e qui-quadrado. Por meio das curvas de secagem observou-se que, quanto maior a temperatura, menor o tempo do processo, sendo a amostra seca na temperatura de 70 °C a que apresentou o melhor resultado, com o tempo de secagem de 270 min e 7,92 % de umidade em base úmida na amostra final. Portanto, a utilização da berinjela seca nessas condições torna-se relevante, uma vez que pode ser utilizada posteriormente na formulação de novos produtos alimentícios, com um tempo de vida útil maior e com as propriedades nutricionais preservadas.

Palavras-chave: Solanaceae, modelagem matemática, teor de água.

INTRODUÇÃO

A berinjela (*Solanum melongena* L.), membro da família Solanaceae, geralmente é cultivada como hortaliça, em regiões subtropicais e tropicais do mundo (SAINI; KAUSHIK, 2019). Os frutos da berinjela contêm uma quantidade significativa de nutrientes, além de outros compostos bioativos promotores da saúde (BLANDO et al., 2018) e também apresentam concentrações consideravelmente maiores de ácidos fenólicos, que são benéficos para a saúde e o desenvolvimento humano (NIÑO-MEDINA et al., 2017).

Há uma diversidade de espécies de berinjelas catalogadas pelo mundo; entre as mais difundidas, tem-se a *Solanum melongena* L. (berinjela comum) e as espécies *Solanum aethiopicum* (berinjela escarlata) e *Solanum macrocarpo*, esta última sendo cultivada na África

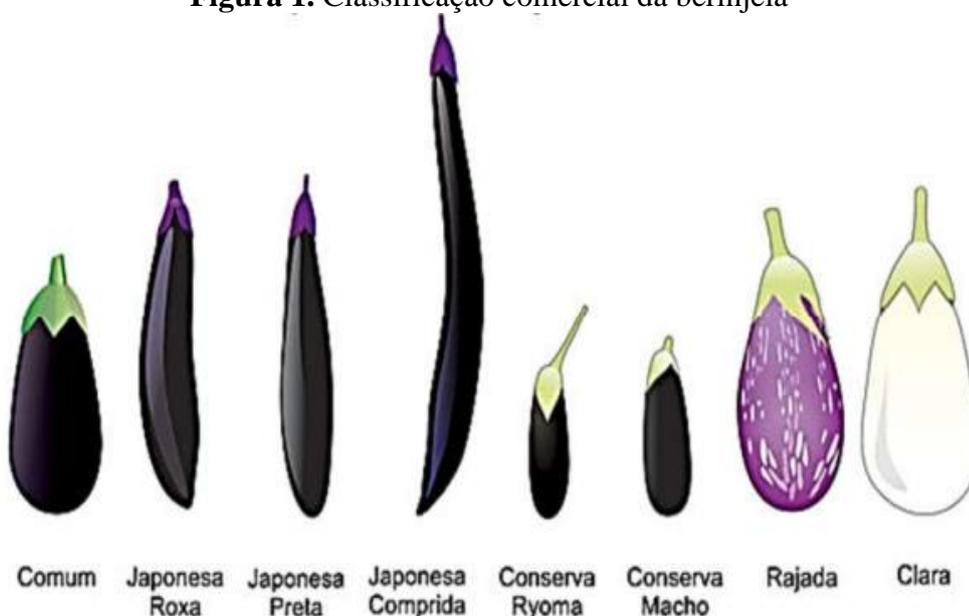
¹ Graduanda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, jessicaraiane@eq.ufcg.edu.br;

² Professora orientadora, doutora, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, arncampos@yahoo.com.br.

subsaariana (MORRIS; TAYLOR, 2016). Os cultivares de berinjelas se diferem entre si em formato, coloração, produtividade, resistência a doenças e brilho dos frutos. No Brasil, geralmente encontra-se a berinjela de formato oblongo, com coloração roxo-escuro, brilhante e pedúnculo verde (EMBRAPA, 2007).

Segundo o Programa Horti & Fruti Padrão da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (MOREIRA; TRANI; TIVELLI, 2006), a berinjela pode ser classificada comercialmente conforme as suas características físicas como cor, comprimento e diâmetro, de acordo com o ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Classificação comercial da berinjela



Fonte: (MOREIRA; TRANI; TIVELLI, 2006).

Apesar dos seus benefícios, a berinjela possui vida útil média de dez dias entre temperatura de 10 e 15 °C, ocasionando uma limitação no seu comércio como um produto fresco (KAVEH; AMIRI CHAYJAN; NIKBAKHT, 2017). Deste modo, é relevante submeter a berinjela a processos que possibilitem o aumento da sua vida útil, visto que possui uma alta atividade de água, tornando-se naturalmente degradável por microrganismos e outras reações biológicas indesejáveis.

A secagem é uma das formas tradicionalmente utilizadas na preservação de produtos perecíveis, assim como a berinjela (ZHANG et al., 2012). Seu principal objetivo é remover parcialmente a água da matriz alimentar e, conseqüentemente, aumentar a vida útil e evitar a deterioração dos alimentos (MORADI et al., 2020). Além disso, o volume e o peso dos alimentos são reduzidos ao longo do processo de secagem, ocasionando a redução de tamanho

na embalagem dos alimentos, facilidade de transporte e baixo custo de armazenamento (LLAVATA et al., 2020).

Um dos métodos mais comuns na secagem de alimentos é a secagem por estufa com corrente de ar, ou também chamada de secagem convectiva de ar quente. Esse método consiste na operação de remoção de água do alimento por meio do mecanismo de vaporização térmica e é realizado através do calor produzido artificialmente em condições controladas de corrente de ar, umidade e temperatura. O ar, que é o meio de secagem de alimentos comumente utilizado, conduz calor ao alimento, promovendo a evaporação da água, além de ser o veículo no transporte do vapor úmido a partir do alimento e para o alimento (MONTEIRO; AZEREDO, 2012).

Com base nesse contexto, objetivou-se estudar a cinética de secagem da berinjela em estufa com corrente de ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais, para prever a melhor temperatura e tempo de secagem do fruto. Esse processo é promissor, uma vez que o produto seco pode ser utilizado posteriormente na formulação de novos produtos alimentícios, com um tempo de vida útil maior e com as propriedades nutricionais preservadas.

METODOLOGIA

As análises foram realizadas no Laboratório de Bioquímica e Biotecnologia de Alimentos (LBBA) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Os frutos de berinjela utilizados nas análises foram adquiridos na feira livre da cidade de Cuité, na Paraíba. Foi dada preferência aos frutos com coloração roxo-escuro, brilhantes e pedúnculos verde, com boa qualidade para o consumo. A uniformidade de cor e firmeza foram analisadas sensorialmente.

Caracterização física da berinjela

Para determinação do comprimento, largura, espessura dos frutos, a medição foi realizada com um paquímetro digital, ZAAS precision, e os resultados expressos em milímetros. A massa foi determinada através da pesagem individual dos frutos, utilizando uma balança digital analítica Shimadzu AY 220 e os resultados expressos em gramas.

Cinética de secagem em estufa com corrente de ar

Para a cinética de secagem em forno estufa, foi utilizada uma estufa com circulação de ar da marca Lucadema, modelo 82/768, com tensão de alimentação de 220 V e potência de 4000 W. O fruto foi cortado no seu sentido transversal (em rodela) e foram realizados experimentos em duplicata, utilizando as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, visando a determinação do melhor tempo e temperatura para a otimização do processo.

Com os dados da secagem, foram determinados os valores da razão do teor de água e, posteriormente, os dados foram aplicados aos modelos matemáticos que estão descritos na Tabela 1. Para o ajuste de cada modelo matemático aos dados experimentais, realizaram-se as análises de regressão não linear pelo método de Quasi-Newton, empregando-se o programa computacional Statistica 8.0 (STARTSOFT, Inc. 2007).

Tabela 1. Modelos matemáticos para prever o fenômeno de secagem

Designação do modelo	Modelos	Equação	Referências
Henderson e Pabis	$RU = a e^{-kt}$	(1)	(HENDERSON; PABIS, 1961)
Verma	$RU = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-k_1t}$	(2)	(VERMA et al., 1985)
Dois termos	$RU = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$	(3)	(HENDERSON, 1974)
Exponencial de dois termos	$RU = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$	(4)	(OZDEMIR; DEVRES, 1999)
Wang e Sing	$RU = 1 + at + bt^2$	(5)	(WANG; SING, 1978)
Henderson e Pabis modificado	$RU = ae^{-kt} + be^{-k_0t} + ce^{-k_1t}$	(6)	(HENDERSON; PABIS, 1961)
Aproximação da difusão	$RU = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$	(7)	(CÔRREA et al., 2010)
Newton	$RU = e^{-kt}$	(8)	(TOGRUL; PCHLIVAN, 2002)
Thompson	$RU = e^{\frac{-a-(a^2+4bt)^{0,5}}{2b}}$	(9)	(ERTEKIN; YADIZ, 2004)
Page	$RU = e^{-kt^n}$	(10)	(OVERHULTS et al., 1973)

RU: razão de teor de água (adimensional); t: tempo de secagem (min); a, b, c, k, k₀, k₁ e n: parâmetros dos modelos.

Fonte: Autora (2021)

A seleção do melhor modelo levou em consideração os seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) (Equação 11), desvio quadrático médio (DQM) (Equação 12) e qui-quadrado (χ^2) (Equação 13).

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2} \right) \quad (11)$$

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{n-N} \sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (13)$$

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; DQM – desvio quadrático médio; χ^2 – qui-quadrado; $RX_{pred,i}$ – razão do teor de água predito pelo modelo; $RX_{exp,i}$ – razão do teor de água experimental; n – número de observações; N – número de constantes do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física da berinjela

Além da coloração do fruto, as características que mais envolvem os consumidores são as dimensões do fruto, visto que o consumidor procura por frutos grandes, vistosos, sem sinais de estragos mecânicos e que apresentem qualidade. Além disso, a massa dos frutos torna-se importante, principalmente para os centros de distribuição e para a compra dos frutos pelo consumidor final (ALVES, 2016).

Deste modo, os resultados da caracterização física da berinjela estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física da berinjela

Características	Valor máximo	Valor mínimo	Média
Comprimento (mm)	189,00	120,00	148,2 ± 22,23
Largura (mm)	65,00	49,00	54,12 ± 4,88
Espessura (mm)	63,00	45,00	51,38 ± 5,54
Massa (g)	237,38	125,84	167,99 ± 32,24

Fonte: Autora (2021)

Como é possível analisar, o valor médio obtido para o comprimento dos frutos foi 148,2 mm, valor muito próximo ao encontrado por Perez e Germani (2004) que foi de 150 mm, em estudo das características físicas e químicas da farinha de trigo e berinjela. No entanto, a média

da massa dos frutos utilizados por esses pesquisadores foi 356,67 g, valor superior ao encontrado na presente pesquisa.

De acordo com Modolo, Costa (2004), o índice de formato do fruto pode ser obtido em função da razão do comprimento e do diâmetro (L/D), em que valores próximos de 1 indicam formato mais arredondado, e valores superiores a 1 indicam formato alongado. Segundo os autores essa é uma característica importante para o processamento dos frutos de maxixe (*Cucumis anguria*) na forma de picles, seja inteiro ou fatiado. Considerando que a medida da largura do fruto equivale a seu diâmetro, pode-se verificar que os frutos analisados apresentaram formato alongado, com valor médio da razão L/D igual a 2,74.

Cinética de secagem em estufa com corrente de ar

A Tabela 3 apresenta os valores de coeficiente de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e qui-quadrado (χ^2) para cada modelo matemático de secagem da berinjela em estufa de circulação de ar.

A partir da Tabela 3, verifica-se que o modelo matemático que melhor representou os dados experimentais da cinética de secagem em estufa com circulação de ar para as três temperaturas escolhidas, foi o de Wang e Sing. Esse modelo apresentou os maiores valores para o coeficiente de determinação, indicando o quanto foi capaz de explicar os dados coletados. Além disso, apresentou os menores valores do desvio quadrático médio e qui-quadrado, indicando que os dados possuem baixas dispersão e divergência entre a distribuição dos mesmos e uma distribuição esperada.

A avaliação da cinética de secagem de resíduos de jaca foi realizada por Sousa et al. (2021) em estufa a 40, 50 e 60 °C e o modelo Wang e Sing foi o que melhor representou à secagem em estufa em todas as temperaturas avaliadas, apresentando os melhores valores de coeficiente de determinação e menores desvios quadráticos médios e qui-quadrados.

Tabela 3. Valores de coeficiente de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e qui-quadrado (χ^2) para os modelos matemáticos escolhidos.

Modelo	Temperatura (°C)	R^2	DQM	χ^2
Henderson e Pabis	50	0,992326	0,022830	0,000521
	60	0,983321	0,029132	0,000848
	70	0,989391	0,026138	0,000683
Verma	50	0,998635	0,009627	0,000092
	60	0,996013	0,014243	0,000202
	70	0,997738	0,012067	0,000145
Dois termos	50	0,992326	0,022830	0,000521
	60	0,983321	0,029132	0,000848
	70	0,989385	0,026146	0,000683
Exponencial de dois termos	50	0,987295	0,029376	0,000863
	60	0,975892	0,035025	0,001226
	70	0,982644	0,033433	0,001117
Wang e Sing	50	0,999435	0,006193	0,000038
	60	0,998428	0,008943	0,000080
	70	0,999329	0,006571	0,000043
Henderson e Pabis modificado	50	0,992323	0,022835	0,000521
	60	0,983321	0,029133	0,000848
	70	0,989391	0,026138	0,000683
Aproximação da difusão	50	0,998640	0,009608	0,000092
	60	0,996020	0,014229	0,000202
	70	0,997743	0,012054	0,000145
Newton	50	0,987648	0,028965	0,000839
	60	0,976295	0,034730	0,001206
	70	0,983014	0,033075	0,001094
Thompson	50	0,987645	0,028969	0,000083
	60	0,976290	0,034734	0,001206
	70	0,983010	0,033079	0,001094
Page	50	0,998641	0,009605	0,000092
	60	0,996306	0,013710	0,000188
	70	0,997949	0,011490	0,000132

Fonte: Autora (2021)

Desta forma, a Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros do modelo de Wang e Sing, que é tradicionalmente utilizado nos estudos de secagem, ajustado aos dados experimentais da cinética de secagem da berinjela em estufa de circulação de ar.

Tabela 4. Parâmetros a e b obtidos no modelo de Wang e Sing para a cinética de secagem da berinjela em estufa de circulação de ar

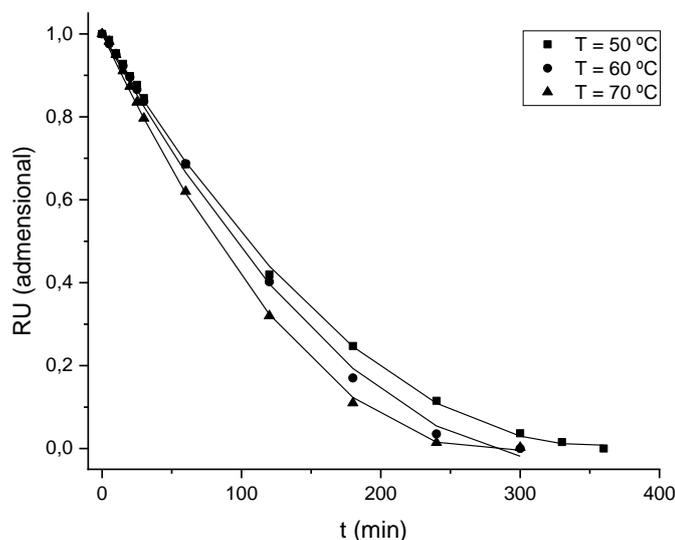
Temperatura (°C)	Parâmetros	
	a	b
50	-0,005624	0,000008
60	-0,006113	0,000009
70	-0,007174	0,000013

Fonte: Autora (2021).

É possível analisar a partir da Tabela 4 que, os valores encontrados para o parâmetro a diminuíram com o aumento da temperatura. Essa mesma tendência foi observada por Souza et al. (2019) e Sousa et al. (2021).

A Figura 2 apresenta as curvas de secagem da berinjela obtidas em estufa com circulação de ar e estimadas pelo modelo de Wang e Sing, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Figura 2. Valores experimentais da razão do teor de água estimados pelo modelo de Wang e Sing para a secagem da berinjela em estufa com circulação de ar



Fonte: Autora (2021)

A cinética de secagem apresentou uma diminuição gradativa do teor de água com o tempo, até se tornar constante. Além disso, observa-se que, mesmo para diferentes temperaturas aplicadas, a secagem da berinjela apresentou comportamento semelhante. Verifica-se também que a temperatura e tempo ideais para secagem da berinjela em estufa de circulação de ar são, respectivamente, 70 °C e 270 min. Visto que, nesta temperatura o período de secagem foi reduzido, além de que apresentou a menor umidade em base úmida, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Umidade em base úmida (UBU) para a berinjela seca em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	UBU (%)
50	19,27
60	14,66
70	7,92

Umidade inicial = 93,55 %

Fonte: Autora (2021)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No processo de secagem da berinjela em estufa com circulação de ar, o modelo de Wang e Sing foi o mais indicado para representar o fenômeno, uma vez que apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação e os menores valores de desvio médio quadrático e qui-quadrado, além de ser o de mais simples aplicação. Mesmo para diferentes temperaturas utilizadas, o comportamento das curvas de secagem foi semelhante, com uma diminuição gradativa do teor de água com o tempo, até se tornar constante. Além disso, pode-se observar através das curvas de secagem que a temperatura e tempo ideais para esse processo são, respectivamente, 70 °C e 270 minutos. Ao utilizar essas condições, o tempo de processo foi reduzido, em relação as demais temperaturas utilizadas, e a amostra final não teve sua estrutura comprometida, apresentando apenas 7,92 % de teor de água final. Portanto, a berinjela seca nessas condições se mostra promissora para futuros trabalhos direcionados à elaboração de produtos farináceos e posterior aplicação dessas farinhas na elaboração e/ou preparo de produtos alimentícios.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. J. S. **Caracterização e conservação de hortaliças com recobrimento comestível**. Monografia (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2016.
- BLANDO, F. et al. Radical scavenging and anti-inflammatory activities of representative anthocyanin groupings from pigment-rich fruits and vegetables. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 1, p. 1–15, 2018.
- CÔRREA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M., GONELI, A. L. D., CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arábica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.
- EMBRAPA. Berinjela (*Solanum melongena* L.). **Embrapa-CNPQ**, 2007. Disponível em: https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Beringela/Beringela_Solanum_melongena_L/coeficientestecnicos.html. Acesso em 01 de setembro de 2021.
- ERTEKIN, C.; YALFIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 3, p. 349-359, 2004.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.
- HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin-layer drying equation. **Transactions of the American Society of Agricultural**, v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974.
- KAVEH, M.; AMIRI CHAYJAN, R.; NIKBAKHT, A. M. Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 53, n. 6, p. 2045–2059, 2017.
- LLAVATA, B. et al. Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. **Current Opinion in Food Science**, v. 35, p. 20–26, 2020.
- MODOLO, V. A.; COSTA, C. P. DA. Production of paulista gherkin using trellis net support. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 1, p. 43–46, 2004.
- MONTEIRO, H.; AZEREDO, C. DE. Alimentos. n. January, 2012.
- MORADI, M. et al. Drying of green bell pepper slices using an IR-assisted Spouted Bed Dryer: An assessment of drying kinetics and energy consumption. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 60, n. December 2019, p. 102280, 2020.
- MOREIRA, S. R.; TRANI, P. E.; TIVELLI, S. W. Berinjela. **Instituto Agronômico**, 2006. Disponível em: www.iac.sp.gov.br/tecnologias/berinjela/berinjela.htm. Acesso em 01 de setembro de 2021.
- MORRIS, W. L.; TAYLOR, M. A. **The Solanaceous Vegetable Crops: Potato, Tomato,**

Pepper, and Eggplant. Second Edi ed. [s.l.] Elsevier, 2016. v. 3

NIÑO-MEDINA, G. et al. Structure and content of phenolics in eggplant (*Solanum melongena*) - a review. **South African Journal of Botany**, v. 111, p. 161–169, 2017.

OVERHULTS, D. G., WHITE, G. M., HAMILTON, H. E., ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. **Transactions of the of the American Society of Agricultural**, v. 16, n.1, 1973.

OZDEMIR, M.; DEYRES, Y. O. The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 225-233, 1999.

PEREZ, P. M. P.; GERMANI, R. Farinha mista de trigo e berinjela: características físicas e químicas. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 22, n.1, p. 15-24, 2004.

SAINI, D. K.; KAUSHIK, P. Visiting eggplant from a biotechnological perspective: A review. **Scientia Horticulturae**, v. 253, n. February, p. 327–340, 2019.

SOUSA, A. P. M.; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P. G.; COSTA, J. D.; MACEDO, A. D. B.; SANTANA, R. A. C. Cinética de secagem de resíduos de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, 2021.

SOUZA, D. G., RESENDE, O., MOURA, L. C., FERREIR JUNIOR, W. N., & Andrade, J. W. S. Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). **Engenharia Agrícola**, v. 39, p. 176-181, 2019.

STATSOFT, Inc. STATISTICA, Versão 8. **AStA**, v. 91, p. 339–341, 2007.

TOGRUL, I. T.; PCHILIVAN, D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thinlayers. **Journal of Food Engineering**, v. 40, n. 3, p. 219–226, 2002.

VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, v. 28, p. 296- 301, 1985.

WANG, C.Y.; SINGH, R.P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **ASAE Paper**, p. 78-6505, 1978.

ZHANG, L. et al. Drying characteristics and color changes of infrared drying eggplant. **Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 28, n. SUPPL. 2, p. 291–296, 2012.