

CAPÍTULO 9

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS DA SECAGEM DA CASCA DE UMBU (*SPONDIAS TUBEROSA ARR. CAM*) COM SECADOR CONVECTIVO DE BANDEJAS

Vitor Fockink Silva Batistela
Emily Andressa Garcia Delvalle
Julia Silva da Paixão
Priscila Vieira dos Santos
Dalice Rui Furini
Raquel Manozzo Galante
Leandro Osmar Werle

RESUMO

O objetivo do trabalho foi determinar as cinéticas de secagem pelo mecanismo da difusão mássica, para casca de umbu (*Spondias tuberosa Arr. Cam*). Utilizou-se um secador de bandejas nas temperaturas 60°C e 75°C com circulação forçada de ar e determinou-se o coeficiente de difusividade. Os valores encontrados dos coeficientes de difusividade a 60°C ($4,8941 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) e a 75°C ($6,4055 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) demonstraram como esse parâmetro está diretamente relacionado com a temperatura.

PALAVRAS-CHAVE: Umbu. Cinética da Secagem. Desidratação. Umidade.

1. INTRODUÇÃO

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa Arr. Cam*) é uma fruteira nativa do nordeste brasileiro de regiões semi-áridas. É uma planta xerófila, caducifólia, da mesma família das anacardiáceas, compatível ao calor, aos solos pobres e à inexistência de água. É uma árvore de pequeno porte, de copa em formato de guarda-chuva, esparramada, de tronco pequeno, com galhos retorcidos e muito ramificados (MENDES, 1990).

O fruto da umbu cajazeira é caracterizado como uma drupa arredondada, de cor amarela, casca fina e lisa, com endocarpo chamado “caroço”, grande, branco, suberoso e enrugado, localizado na parte central do fruto, no interior do qual se encontram os lóculos, que podem ou não conter uma semente (SOUZA, 1997). A umbu cajazeira apresenta cerca de 90% dos endocarpos desprovidos de sementes o que torna inviável a sua propagação sexuada, sendo tradicionalmente propagada por estaquia (LOPES, 1997).

Atualmente os frutos do umbuzeiro têm recebido espaço nos mercados nacional e internacional, pois, além de apresentarem um sabor muito agradável e aroma peculiar, encontram-se uma boa fonte de compostos bioativos e seu consumo pode contribuir substancialmente na dieta (ALMEIDA, 2011). Entretanto devido ao consumo de frutas na

alimentação humana tem deixado de ser somente um prazer para converter se em uma necessidade, dadas as boas características que as mesmas têm para a saúde e bem estar do homem. As frutas são fontes muito boas de energia, carboidratos, diversas vitaminas, minerais e produtos com propriedades bioativas (ALVES, 2006).

No caso do fruto do umbu, ao extrair a polpa da fruta, são gerados resíduos, sendo estes constituídos pelas cascas que podem apresentar teores de fibras, minerais, vitaminas, compostos antioxidantes e bioativos, as vezes superiores aos presentes na polpa. De acordo com Storck *et al.* (2013) observa-se um aumento do interesse da indústria em utilizar métodos viáveis para o aproveitamento destes materiais residuais transformando-os em benefícios financeiros e minimizando impactos ambientais.

Segundo Fellows (2006) a desidratação, ou secagem, é uma técnica conhecida e eficiente para aumentar a durabilidade dos alimentos, diminuindo peso e volume, assim reduzindo os custos de manuseio e estocagem, por meio da extração da água presente nos alimentos através da exposição ao calor sob temperatura controlada, por evaporação, sendo um dos meios a secagem em estufa. Assegurando ao consumidor final o consumo de alimento com atributos nutricionais parecido ao *in natura*.

Este processo é amplamente utilizado pois melhora a estabilidade dos alimentos através da redução da atividade de água e conseqüentemente a minimização da atividade microbiológica e de algumas modificações físicas e químicas ao decorrer do armazenamento (GURGEL, 2014). Segundo Botelho (2015), ao determinar a modelagem das curvas de secagem do produto, é provável determinar índices físicos e termodinâmicos associados às transferências de calor e massa, dentre eles o coeficiente de difusão. Este índice possibilita avaliar e comparar a velocidade de secagem de produtos com tamanhos, formas e texturas diferentes. Já os índices termodinâmicos, que revelam a dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, permitem avaliar energeticamente o processo de secagem.

Além de ser importante fonte de informação para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água absorvida e avaliar a microestrutura e os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos (CORRÊA, 2010). Portanto, o objetivo deste trabalho foi determinar as cinéticas de secagem da casca de umbu pelo método de mecanismo da difusão mássica, e a determinação de um coeficiente difusivo de transferência de massa, utilizando um secador de bandejas com circulação forçada de ar, empregando diferentes temperaturas (60-75°C).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Material

O trabalho foi conduzido nos laboratórios do Curso de Engenharia de Alimentos, na Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD. Foi realizado inicialmente o preparo da amostra, sendo o fruto umbu adquirido no comércio local da cidade de Dourados-MS, separou-se manualmente as cascas dos frutos, sendo as cascas utilizadas para os ensaios (Figura 1).

Figura 1: Fruto do umbu (a) e as cascas do umbu (b)



Fonte: Autoria própria (2022).

Mediu-se a espessura e o diâmetro médio das cascas, por meio de paquímetro digital (MTX, Brasil). Posteriormente as cascas foram dispostas sobre um vidro relógio, pesadas em balança digital (OHAUS, Brasil), determinando a umidade inicial. Foi utilizado um secador convectivo de bandejas com fluxo vertical com velocidade de circulação constante de aproximadamente $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ para realizar a desidratação das cascas de umbu, ajustando-o em temperaturas de 60 ± 2 e 75 ± 2 °C.

2.2. Obtenção das Curvas de Secagem

A determinação da curva de secagem foi realizada por meio de pesagens consecutivas das amostras, analisando o teor de água removido, onde, nas duas primeiras horas de secagem as amostras foram pesadas em intervalos de 15 min, terceira e quarta hora a cada 30 minutos e as demais, a cada 1 h até a obtenção de peso constante ($\pm 0,001$ g), atingindo o teor de umidade em equilíbrio (X_e). Por fim, foi obtido o peso final da amostra seca (W_{ss}) após a permanência da amostra por 24 h dentro do secador.

A umidade inicial e ao longo do tempo (X_t) para as amostras analisadas das cascas do umbu foram determinadas empregando o peso da água evaporada e do peso final da amostra seca (W_{ss}). Foram construídas a curva típica de secagem plotando-se a umidade em função do tempo, durante o período de secagem.

A taxa de secagem, R_a ($\text{gH}_2\text{O}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$) descrita pela Equação 1, foi obtida a partir do método numérico com a derivação dos dados de umidade em relação ao tempo, além do peso final da amostra seca e da área superficial (A) da amostra, determinada pela aproximação à área transversal de um cilindro, utilizando o diâmetro médio da amostra inicial.

$$R_a = \frac{W_{ss} \cdot \Delta X}{A \cdot \Delta t} \quad (1)$$

O adimensional de umidade livre (y) foi obtido através da Equação 2.

$$y = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2)$$

Onde: X_t é o teor de umidade do produto ao longo do tempo, ($\text{gH}_2\text{O}/\text{g}$ sólido seco), X_0 o teor de umidade inicial do produto ($\text{gH}_2\text{O}/\text{g}$ sólido seco) e X_e o teor de umidade de equilíbrio do produto ($\text{gH}_2\text{O}/\text{g}$ sólido seco).

A razão de umidade (RU) das cascas de umbu nas duas temperaturas avaliadas foi definida conforme a Equação 3.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Onde RU, X_e e X_0 representam, respectivamente, o teor de umidade do produto, teor de umidade em equilíbrio do produto e o teor de umidade inicial do produto dados em gramas de água por grama de sólido seco ($\text{gH}_2\text{O} / \text{gSS}$).

2.3. Modelagem Matemática

Os dados experimentais foram ajustados de acordo com o modelo descrito pela 2ª Lei de Fick (Equação 4), para a cinética de secagem de alimentos.

$$y = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\text{Def} \left(\frac{\pi}{2L} \right)^2 t} \quad (4)$$

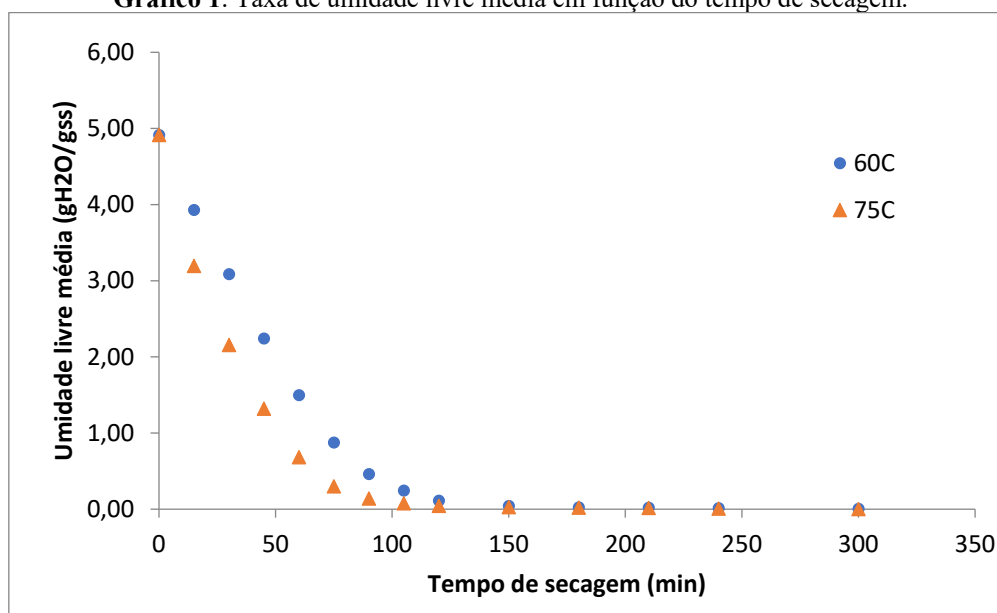
Onde: t se refere ao tempo de secagem (min), k o coeficiente de secagem (min^{-1}); L a espessura (mm), e D_{ef} o coeficiente de difusão efetivo ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$).

A partir da 2ª Lei de Fick (Equação 4) e com aproximação para placa plana de Crank (1975) se obteve a difusividade efetiva (D_{ef}), utilizando valores constantes para espessura, temperatura, umidade inicial e de equilíbrio. Desconsiderando-se a contração volumétrica da amostra e considerando material homogêneo e placa plana, pois a secagem ocorreu com fluxo de ar paralelo a superfície das cascas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de remoção de água do interior dos alimentos ocorre pelos fenômenos de transporte de calor e massa, no qual a exposição do material a uma fonte de calor aquecida promove o aumento da temperatura interna, provocando a difusão da massa de água para a superfície do material e, conseqüentemente sua evaporação. Como ilustrado no Gráfico 1, a umidade livre média das cascas de umbu foi diminuindo ao longo do processo de secagem para as duas temperaturas avaliadas, ou seja, a quantidade de água disponível no alimento foi reduzida, o que explica a baixa variação do peso da amostra após 150 min de processo.

Gráfico 1: Taxa de umidade livre média em função do tempo de secagem.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

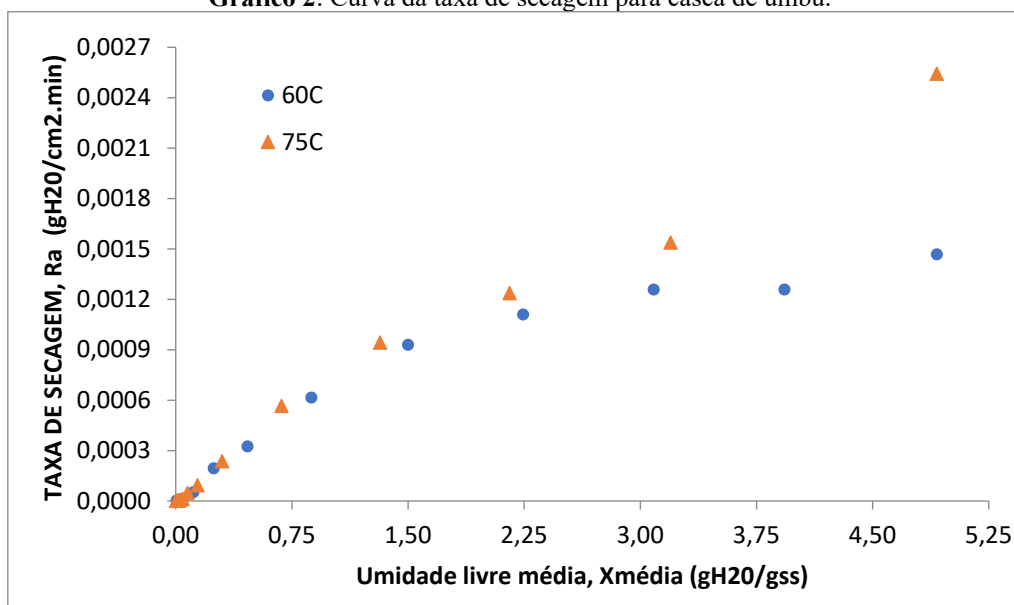
Observa-se que a estabilização ocorreu em torno de 110 minutos, para a temperatura de secagem mais elevada (75°C). Já para temperatura de 60°C percebe-se que o tempo para amostra se estabilizar foi em torno de 150 min. Conclui-se que o incremento de 15 °C na temperatura de secagem possibilitou uma redução do tempo de secagem de 40 min. Os resultados obtidos coincidem com o estudo feito por Oliveira *et al.*, (2016) o qual analisou a secagem de cevadilha vacariana onde a menor temperatura empregada necessitou de maior tempo de secagem até atingir o equilíbrio, de acordo com o mesmo, modificações na temperatura do ar causam alterações nos valores das parcelas condutivas da secagem onde o aumento no valor da temperatura do ar promove uma diminuição na umidade relativa do ar de secagem causando um aumento de diferença entre a umidade relativa do ar de secagem e o material a ser seco o que causa maior taxa de transferência de calor por convecção e um aumento na força motriz de secagem diminuindo o tempo, explicado com base na lei de Newton. Diversos estudos mostram

que a temperatura do ar de secagem é o principal parâmetro relacionado ao tempo de processo da secagem (SANTOS; WERLE, 2021; LISBOA *et al.*, 2019).

No caso da secagem das cascas de umbu, observou-se que houve um escurecimento nas cascas após a finalização do processo de secagem. Ferreira (2010) também observou um escurecimento no estudo de secagem da casca do maracujá amarelo, o qual, segundo autor, se deve à presença de açúcares e proteínas presentes na amostra e a sua longa exposição à temperatura de secagem que favoreceu a reação de Maillard.

A partir do Gráfico 2, que ilustra a curva da taxa de secagem das cascas de umbu, observa-se que não é possível obter um período inicial de acondicionamento ou um período de taxa constante, sendo o processo de secagem das cascas ocorreu totalmente em fase decrescente até obter o teor de umidade de equilíbrio. De acordo com Menezes *et al.* (2013), esse comportamento é decorrente de materiais que apresentam mecanismo físico predominante de difusão molecular interna, onde a exposição a altas temperaturas promove a retirada constante de umidade. Ainda analisando o Gráfico 2, foi possível observar que a maior temperatura (75°C) promove maiores taxas de secagem e, assim, reduz o tempo de secagem das amostras. Nos trabalhos realizados por Bontempo e Castejon (2020) para cinética de secagem da casca de tangerina e o desempenho através de um secador solar, é possível analisar que quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem, sendo maior no início da secagem.

Gráfico 2: Curva da taxa de secagem para casca de umbu.

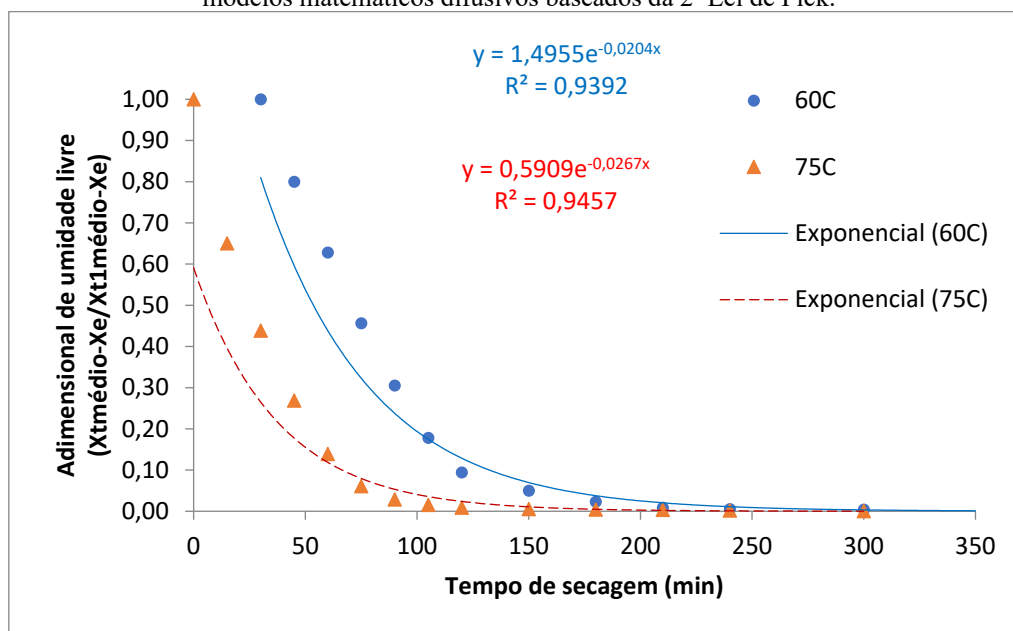


Fonte: Dados da pesquisa (2022).

O comportamento dos dados experimentais frente aos modelos matemáticos baseados da 2ª Lei de Fick, Page e Midilli, pode ser observado no Gráfico 3, no qual, as curvas em relação

aos dados demonstram o melhor perfil de representatividade da desidratação das cascas de umbu em relação ao tempo de secagem, o qual foi desenvolvido o experimento. Além disso, a curva obtida em cada modelo ajustado resulta em coeficientes, constantes e parâmetros estatísticos nos quais, demonstram e determinam matematicamente a melhor representatividade da modelagem frente aos dados experimentais da desidratação da casca da umbu.

Gráfico 3: Curva da cinética de secagem das cascas de umbu nas temperaturas de 60°C e 75°C com ajuste do modelos matemáticos difusivos baseados da 2ª Lei de Fick.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Como mencionado anteriormente, o comportamento das curvas de taxa de secagem das cascas de umbu ocorre pela difusão interna entre os poros capilares, possibilitando a determinação da constante de secagem e da difusividade efetiva por meio da Segunda Lei de Fick. Portanto, as constantes de secagem (k), os coeficientes de difusividade efetiva (D_{ef}) e os parâmetros termodinâmicos obtidas em cada temperatura avaliada neste estudo podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros dos modelos ajustados à cinética de secagem das cascas de umbu nas temperaturas de 60 °C e 75 °C

Nome do modelo	Parâmetros	Temperatura (°C)	
		60	75
2ª Lei de Fick	R ²	0,9392	0,9457
	a	1,4955	0,5909
	k (min ⁻¹)	0,0204	0,0268
	-D _{ef} (cm ² .min ⁻¹)	4,8941x10 ⁻⁶	6,4055x10 ⁻⁶

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Conforme esperado, observou-se que os valores de k aumentaram com a elevação da temperatura de secagem das amostras. De acordo com Silva *et al.* (2015), maiores temperaturas promovem a modificação da viscosidade dos líquidos presentes no interior de produtos agrícolas, favorecendo a movimentação dos fluidos e alterando a difusão da água nos capilares estruturais de vegetais. Convencionalmente, os valores de D_{ef} são dependentes dos valores de k , sendo assim, maiores valores de difusividade deste estudo foram obtidos na maior temperatura de secagem. Na literatura os valores para apresentam valores sendo similares aos Os valores de D_{ef} obtidos estão dentro da faixa de valores para os produtos agroindustriais encontrados na literatura para as duas temperaturas avaliadas deste estudo.

4. CONCLUSÃO

A curva de secagem obteve comportamento característico típico de produtos agroindustriais, apresentando taxa decrescente sem apresentar um período de taxa constante de secagem, fato decorrente de materiais que apresentam mecanismo físico predominante de difusão molecular interna. Houve escurecimento nas cascas após o tempo de secagem devido à presença de açúcares e proteínas presentes na casca de umbu e a sua longa exposição à temperatura de secagem que favoreceu a reação de Maillard. O tempo do processo de secagem da casca de umbu até a umidade de equilíbrio foi de 110 min para a maior temperatura avaliada. O aumento da temperatura de secagem da casca de umbu de 60°C para 75°C promoveu maiores taxas de secagem, reduzindo o tempo de processo em cerca de 40 min. Com o incremento de 15 graus na temperatura de secagem, os parâmetros da constante de secagem e o coeficiente de difusividade das amostras aumentaram, sendo o aumento da difusividade efetiva foi de $4,8941 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ para $6,4055 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ o que justifica a retirada mais rápida da umidade do material. Os modelos difusivos da 2ª Lei de Fick podem ser considerados adequados e precisos na representação da cinética de desidratação para as cascas de umbu.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. M. B; *et al.* **Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh exotic fruits from Northeastern Brazil.** *Food Research International*, São Paulo, SP, p 2155-215, Agosto 2011 (data da publicação). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996911002109>>. Acessado em: Novembro, 2022.)

ALVES, R. E.; BRITO, E. S.; RUFINO, M. do S. M. Título: **Prospecção da atividade antioxidante e de compostos com propriedades funcionais em frutas tropicais.** In: **Congresso Brasileiro de Fruticultura**, 19, 2006, Cabo Frio. Palestras e resumos. Cabo FrioRJ: SBF/UENF/UFRuralRJ. p. 133-141 (2006). Disponível em: <<https://ppgfito.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/45/2021/01/Tese-de-Maria-do-Socorro-Rufino.pdf> . Acessado em: Out. 2022.

BONTEMPO, L. H. S.; CASTEJON, L. V.; SANTOS, K. G. dos. (2020). **Secagem da casca de tangerina: Cinética e desempenho do secador solar convectivo.** *Research, Society and Development*, 9(6), e44963458–e44963458. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i6.3458> Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340707362_Secagem_da_casca_de_tangerina_cinetica_e_desempenho_do_secador_solar_convectivo. Acessado em: Out. 2022.

BOTELHO, F. M.; *et al.* (2015). **Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo.** *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 14(2), 260-271. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2018700129>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Botelho/publication/294733512_Cinetica_de_Secagem_e_Determinacao_do_Coeficiente_de_Difusao_Efetivo_de_Graos_de_Sorgo/links/577a600a08ae355e74f0671b/Cinetica-de-Secagem-e-Determinacao-do-Coeficiente-de-Difusao-Efetivo-de-Graos-de-Sorgo.pdf Acessado em: Out. 2022.

CORRÊA, P. C.; *et al.* (2010) **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem.** *Revista Ceres*, 57(5), 595-601. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/GjxCxPngRWvBXzXt3ZGQNgC/abstract/?lang=pt>. Acessado em: Out. 2022.

DE OLIVEIRA, LUCAS CARVALHO *et al.* "Análise da secagem de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* T.) em leito fixo com escoamento de ar paralelo." In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 37., 2015, São Carlos, SP. Anais... São Carlos, SP: UFSCAR, 2016., 2016.

FERREIRA, Márcia de Fátima Pantoja; PENA, R. S. **Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo.** *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 12, n. 1, p. 15-28, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277927844_Estudo_da_secagem_da_casca_do_Maracuja_amarelo. Acessado em: Out. 2022.

FELLOWS, P. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática.** (2. ed.) Porto Alegre, RS: Artmed. 2006. 148 p.

GURGEL, C. E. M. R. (2014). **Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma – Desempenho do processo e características do produto.** 2014, 85f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22743>. Acessado em: Outubro. Ano:2022.

LISBOA HM, ARAUJO H, Paiva G, ORIENTE S, PASQUALI M, DUARTE ME, *et al.* **Determination of characteristic properties of mulatto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during convective drying.** *J Agric Food Res [Internet]*. 2019 Dec;1(November):100003. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666154319300031> Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/337489804_Determination_of_characteristic_properties_of_mulatto_beans_Phaseolus_vulgaris_L_during_convective_drying. Acessado em: Novembro. Ano:2022.

LOPES, W. F. **Propagação assexuada de cajá (*Spondias mombin* L.) e cajá umbu (*Spondias* spp.) através de estacas Areia**, 47 p. (Relatório final PIBIC- CNPq). 1997.

MENEZES, M. L. *et al.* **Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo.** *Engvista*, v. 15, n. 2, p. 176, 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/292262296_Analise_da_cinetica_e_ajustes_de_modelos_matematicos_aos_dados_de_secagem_do_bagaco_do_maracuja-amarelo. Acessado em: Novembro, 2022.

MENDES, B. V. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.): importante fruteira do semi-árido. Mossoró: ESAM, 1990. 63 p. (ESAM. Coleção Mossoreense, série C, v. 564).

SANTOS, L.G DOS, WERLE, L. O. Influência da temperatura de secagem de fatias da polpa de abóbora menina brasileira nos parâmetros cinéticos e termodinâmicos. *Rev Bras Agrotecnologia*. 2021;11(2):556–62. Disponível em:

<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO/article/view/8761>. Acessado em: Novembro, 2022.

SILVA, L. A. *et al.* **Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.).** *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 17, n. 4, p. 953–963, 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbpm/a/cF7GKWQX35Kk5dMhkbzrDzF/?lang=pt&format=pdf>. Acessado em: Out. 2022.

SOUZA, F.X. de.; SOUSA, F.H.L.; FREITAS, J.B.S; ROSSETTI, A.G. Caracterização morfológica de endocarpos de umbu-cajá. In: **CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, 48., 1997, Crato. Resumos [...]. Fortaleza: SBB, 1997. p. 121. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cta/a/nVLYx8rTWcCVYs8RhDzgDB/?lang=pt>. Acessado em: Out. 2022.

STORCK, C. R.; NUNES, G. L.; OLIVEIRA, B. B. BASSO, C. **Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações.** *Ciência Rural*, v. 43, n. 3, p. 537-543, 2013. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cr/a/MbK4GTbwHtDHFP3bkBK86kF/abstract/?lang=pt>. Acessado em: Outubro 2022.