

MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM DO CAQUI NA FORMA DE CHIPS

Thalis Leandro Bezerra de Lima¹
Daniela Dantas de Farias Leite²
Francislaine Suelia dos Santos³
Rondinele Nunes de Araújo⁴
Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo⁵

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar as curvas de cinética de secagem dos chips do caqui nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, ajustar os modelos matemáticos da Aproximação da Difusão, Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis, Midilli e Page aos valores experimentais. A temperatura exerceu influência sobre o tempo de secagem, onde nas maiores temperaturas demandaram os menores tempos para o equilíbrio higroscópico. O modelo de Aproximação da difusão foi selecionado como o mais adequado para prever o fenômeno de secagem, apresentando $R^2 > 0,998$, menores desvios quadráticos médios ($DQM < 0,022$) e distribuição aleatória dos resíduos em todas as temperaturas estudadas.

Palavras-chave: *Diospyros kaki* L., secagem convectiva, desidratação de frutas.

INTRODUÇÃO

O caqui (*Diospyros kaki* L.) é um fruto nativo de regiões subtropicais e temperadas do continente asiático. No Brasil vem sendo cultivado desde o início do século XX nas regiões Sudeste e Sul, atualmente se expandindo para regiões tropicais do país, como no Vale do São Francisco (LOPES et al., 2014). Sendo consumido de preferência in natura e podendo ser industrializado e transformado em produtos como vinagre, sucos e frutos secos (CAVALCANTE et al., 2007). Destaca-se por sua composição nutricional, sendo rica em vitamina C e carotenoides, sua funcionalidade

¹ Mestrando do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, tthallisma@gmail.com;

² Doutora pelo Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, danieladantasfl@gmail.com;

³ Doutoranda pelo Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, francislainesuelis@gmail.com;

⁴ Doutorando pelo Curso de Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, rondinele_nunes@hotmail.com;

⁵ Doutora pelo Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, atualmente é professora titular na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, rossanamff@gmail.com.

também chama atenção devido à abundância em compostos fenólicos, incluindo flavonóides, ácido gálico, catequinas e taninos condensados, que ao serem consumidos contribuem para o aumento do potencial antioxidante (PARK et al., 2006).

No entanto, sua alta perecibilidade tem provocado grandes perdas do fruto durante o armazenamento que se devem, em maior importância, ao excesso de maturação, perda de firmeza, podridões e à incidência de escurecimento da casca dos frutos (PÊ et al., 2016). Sendo necessários estudos de tecnologias que promovam a extensão de sua vida útil. Dentre os métodos, a secagem é o principal procedimento utilizado no processamento de produtos agrícolas uma vez que aumenta o tempo de vida, promovendo a desaceleração das atividades metabólicas que culminam na depreciação do produto.

No processo de secagem ocorrem transferências simultâneas de calor e massa, provocando modificação das atividades biológicas e na composição química e estrutura física do produto (RESENDE et al., 2010). A análise do comportamento da transferência de massa durante o processo entre o produto e o agente de secagem, pode ser obtida através da cinética de secagem (SIQUEIRA et al., 2012). Seu estudo secagem desperta o interesse de pesquisadores para os mais diversos tipos de frutos. Porém são poucos os relatos relacionados a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem do caqui.

Diante do exposto, objetivou-se desidratar caqui em forma de chips nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, avaliando seus dados de secagem.

METODOLOGIA

A matéria-prima utilizada foi o caqui (*Diospyros kaki* L.), da variedade Fuyu (Figura 1A), adquiridos no mercado local da cidade de Campina Grande – PB, foram levados ao laboratório, selecionados e descartados os que apresentavam injúrias mecânicas e/ou físicas; em seguida, foi realizada a lavagem em água corrente e sanitização em água clorada (50 ppm) por 15 min e, posteriormente, enxague em água corrente. Os frutos foram descascados e realizado corte transversal com espessura de 3 mm (Figura 1B).

Os frutos em forma de chips foram colocadas em cestas teladas, com aproximadamente 50 g, e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

Figura 1 - Caqui (Diospyros kaki L.) variedade Fuyu (A); Caqui em fatias (B)



As cinéticas de secagem, realizadas em triplicata, foram obtidas através da pesagem das amostras em intervalos regulares de 5, 10, 20, 30 e 60 min, até massa constante. No final das secagens foram determinadas as massas secas, calculadas as razões do teor de água das amostras (Equação 1) e traçadas as curvas de razão do teor de água em função do tempo de secagem.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto (base seca);

X_i - teor de água inicial do produto (base seca); e,

X_e - teor de água de equilíbrio do produto (base seca).

Os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1 foram ajustados às curvas de cinética de secagem do caquis através de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, empregando-se o programa computacional Statistica 7.0.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de cinética de secagem do caqui

Designação do modelo Matemático	Modelo	Equação
Aproximação da difusão	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(2)
Dois termos	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-q \cdot t)$	(3)
Exponencial de dois termos	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - t) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(4)
Henderson e Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(5)
Midilli	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(6)
Page	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	(7)

RX - Razão do teor de água do produto, adimensional; k - Constantes de secagem; a, b, n, q - Coeficientes dos modelos; t - Tempo de secagem (min)

Para a escolha do melhor modelo matemático foram considerados o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM) (Equação 8) e a distribuição dos resíduos. Sendo considerado como um ajuste satisfatório o modelo que apresentar alto valor de R^2 , próximo a um (1), baixo valor de DQM e que a distribuição dos resíduos seja aleatória. A distribuição dos resíduos é considerada aleatória quando os valores dos resíduos se encontram próximos à faixa horizontal em torno do zero como também não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados.

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{pred} - RX_{exp})^2}{n}} \quad (8)$$

Em que:

DQM - desvio quadrático médio;

RX_{pred} - razão do teor de água predito pelo modelo;

RX_{exp} - razão do teor de água experimental; e,

n - número de observações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 têm-se os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem dos chips de caqui desidratados a 60, 70 e 80 °C, os coeficientes de determinação, os desvios quadráticos médios e a distribuição dos resíduos.

Tabela 2 - Parâmetros obtidos, coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) e distribuição dos resíduos (DR) dos modelos matemáticos ajustados às curvas de cinética de secagem do caqui

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros					R^2	DQM	DR
		a	b	k	n	q			
Aproximação da difusão	60	-0,0662	0,1686	0,1375	-	-	0,9997	0,0086	A
	70	-0,0333	0,0067	0,7082	-	-	0,9984	0,0192	A
	80	-0,0850	0,0201	1,6050	-	-	0,9988	0,0161	A
Dois termos	60	0,5111	0,5110	0,2201	-	0,0221	0,9994	0,0113	A
	70	0,5108	0,5108	0,3178	-	0,0178	0,9982	0,0201	A
	80	0,5209	0,5209	0,3306	-	0,0360	0,9980	0,0209	A
Exponencial de dois termos	60	0,0031	-	6,8956	-	-	0,9990	0,0141	T
	70	0,0030	-	6,6814	-	-	0,9979	0,0221	A
	80	0,0001	-	7,2155	-	-	0,9971	0,0248	A
Henderson e Pabis	60	1,0222	-	0,0221	-	-	0,9994	0,0113	A
	70	1,0216	-	0,0278	-	-	0,9982	0,0201	A
	80	1,0418	-	0,0306	-	-	0,9980	0,0209	A
Midilli	60	1,0040	0,0001	0,0169	1,0662	-	0,9997	0,0088	A
	70	8,1035	0,0145	0,0186	0,0001	-	0,9919	0,4118	T
	80	1,0211	0,0001	0,0229	1,0764	-	0,9983	0,0190	A
Page	60	-	-	0,0165	1,0697	-	0,9996	0,0092	A
	70	-	-	0,0193	1,0657	-	0,9984	0,0191	A
	80	--	-	0,0220	1,1073	-	0,9982	0,0198	A

Observou-se que todos os modelos resultaram em bons ajustes, com coeficientes de determinação superiores a 0,99 e desvios quadráticos médios inferiores a 0,5, destacando-se o modelo de Aproximação da difusão com os maiores R^2 ($> 0,9984$) e os

menores DQM ($< 0,02$) em todas as temperaturas de secagem, além de apresentarem a distribuição dos resíduos aleatório em todas as temperaturas em estudo.

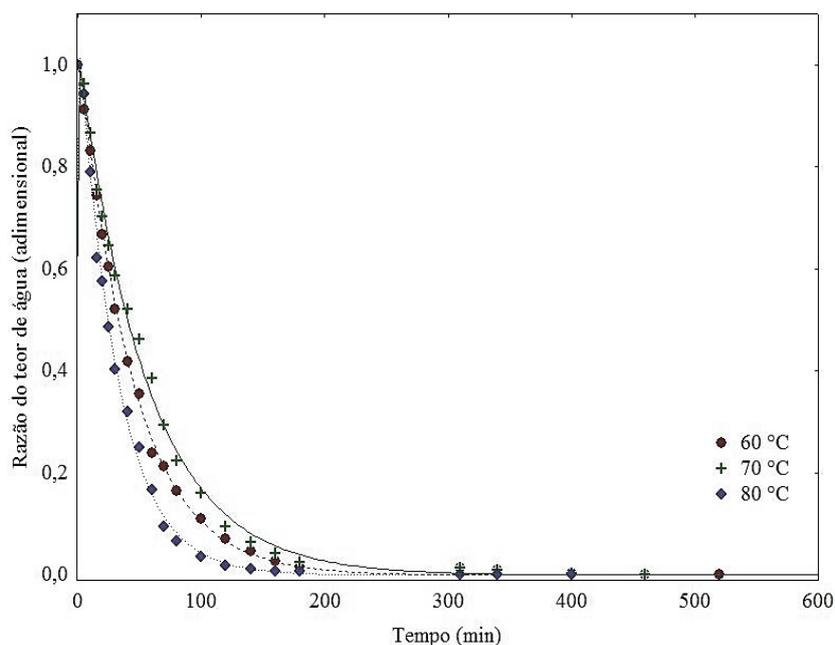
Para a seleção do melhor modelo matemático ajustados aos dados experimentais também observou-se a tendência de distribuição de resíduos de todos os modelos ajustados as curvas de cinética de secagem. Gonelli et al. (2011) relataram que um modelo é considerado aceitável se os valores dos resíduos apresentarem distribuição aleatória. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em questão. A não formação de figuras definidas indica aleatoriedade dos resultados (SANTOS et al., 2013). Observando-se que na maioria dos modelos houve aleatoriedade dos dados, considerando-se um ótimo ajuste aos dados matemáticos.

A constante de secagem k dos modelos testados em sua maioria apresentaram tendência crescente com o aumento da temperatura, consequência de maiores taxas de secagem, conforme Corrêa et al. (2010), que relacionam o parâmetro k com as taxas de secagem, conduzindo ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de exposição do produto ao ar de secagem. Comportamento semelhante foi observado por Santos et al. (2019) ao avaliarem a modelagem matemática de fatias de acuri (*Attalea phalerata* Mart.) nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C reportando o aumento da constante k com o aumento da temperatura de secagem.

A constante n dos modelos de Midilli e Page, relacionada à resistência interna do material à secagem (PEREZ et al., 2013), não apresentou comportamento definido com incrementos das temperaturas, sugerindo que as condições externas apresentam maior influência nas secagens. Martins et al. (2014) também verificaram, ao ajustarem o modelo de Midilli às cinéticas das cascas de mulungu (*Erythrina velutina*) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, que não houve dependência do parâmetro n com o acréscimo da temperatura.

Na Figura 2 estão dispostas as curvas das cinéticas de secagem do chips de caqui ajusta-das pelo modelo de Aproximação da difusão, escolhido para representar as curvas devido ao melhor conjunto de valores dos R^2 , DQM e distribuição dos resíduos.

Figura 2 - Curvas de cinética de secagem do chips de caqui nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C ajustadas pelo modelo de Aproximação da difusão



Observou-se a influência da temperatura nas curvas, apresentando redução consistente no tempo de desidratação com o aumento da temperatura do ar. Comportamento semelhante é relatado por Corrêa Filho et al. (2015) na secagem do figo (*Ficus carica* L.) nas temperaturas de 40, 55 e 70 °C e Elmas et al. (2019) na secagem de jujuba (*Zizyphus jujuba*) em secador convectivo nas temperatura de 60, 70 e 80 °C. Os tempos de secagem foram de 520, 460 e 400 min nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C respectivamente, com teores de água final de 12,34% (b.u.) na temperatura de 60 °C, 11,25% a 70 °C, e 8,61% a 80 °C.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temperatura exerceu influência sobre o tempo de secagem, onde nas maiores temperaturas demandaram os menores tempos para o equilíbrio higroscópico. Dentre os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem dos chips de caqui, o Aproximação da difusão foi selecionado como o mais adequado para prever o fenômeno estudado, apresentando os maiores valores de R^2 , os menores desvios quadráticos médios e distribuição dos resíduos aleatória.

Os modelos matemáticos demais modelos em estudo, também podem ser utilizados para estimar os dados experimentais da cinética de secagem dos chips do

caqui, pois resultaram em bons ajustes aos dados experimentais na faixa de temperatura estudada.

REFERÊNCIAS

CAVALCANTE, I. H. L.; MARTINS, A. B. G.; OLIVEIRA, I. V. M.; BECKMANN, M. Z. Características de frutos de cinco variedades de caqui madurados em la planta o en post cosecha. **Revista de Biología e Ciências da Terra**. v. 7, n. 2, p. 201-209. 2007.

CORRÊA, 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 arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CORRÊA FILHO, L. C.; ANDRADE, E. T.; MARTINAZZO, A. P.; ANDREA, E. M.; SOUSA, F. A.; FIGUEIRA, V. G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p.797-802, 2015.

ELMAS, F.; VARHAN, E.; KOÇ, M. Drying characteristics of jujube (*Zizyphus jujuba*) slices in a hot air dryer and physicochemical properties of jujube poder. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 13, n. 1, p. 70-86, 2019.

GONELLI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; BAPTESTINI, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.

LOPES, P. R. C.; OLIVEIRA, I. V. M.; OLIVEIRA, J. E. M.; ASSIS, J. S. Cultivo do Caquizeiro no Vale do São Francisco. **Embrapa Semiárido. Circular Técnica**, v.107. 10 p. 2014.

MARTINS, J. J. A.; MARQUES, J. I.; SANTOS, D. C.; ROCHA, A. P. T. Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 6, p. 1652-1660, 2014.

PARK, Y-S.; JUNG, S-T.; KANG, S-G.; DELGADO-LICON, E.; AYALA, A. L. M.; TAPIA, M. S.; MARTIN-BELLOSO, O.; TRAKHTENBERG, S.; GORINSTEINI, S. Drying of persimmons (*Diospyros kaky* L.) and the following changes in the studied bioactive compounds and the total radical scavenging activities. **LWT - Food Science and Technology**, v. 39, n. 7, p. 748-755, 2006.

PÊ, P. R.; CARNEIRO, G. G.; PÊ, F. R.; DE CASTRO, D. S.; SILVA, D. R. S.; MARQUES, L. F. Secagem de polpa de caqui pelo método de camada de espuma. **Holos**, v. 4, p. 77-85, 2016.

PEREZ, L. G.; OLIVEIRA, F. M. N. DE; ANDRADE, J. S.; MOREIRA FILHO, M. Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 102-106, 2013.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vignaangularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p.171-178, 2010.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.

SANTOS, D. C.; LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, F. S.; LIMA, T. L. B.; FIGUEIREDO, R. M. F.; COSTA, T. N. Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, p. 1-12, 2019.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Dryng kinetes of jatropa seeds. **Revista Ceres**, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012.