

**Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba****Models of prediction of drying kinetics of algaroba grains**

DOI:10.34117/bjdv6n3-113

Recebimento dos originais: 29/02/2020

Aceitação para publicação: 10/03/2020

**Atacy Maciel de Melo Cavalcante**

Mestre em Tecnologia Agroalimentar pela Universidade Federal da Paraíba  
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da  
Universidade Federal de Campina Grande. Professora do Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Barreiros

Endereço: Rua Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB, CEP: 58429-900 - Brasil

E-mail: atacymaciel@hotmail.com; atacy.maciel@barreiros.ifpe.edu.br

**Renata Duarte Almeida**

Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande  
Endereço: Rua Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB, CEP: 58429-900 - Brasil

E-mail: renatadual@yahoo.com

**Anely Maciel de Melo**

Mestre em Tecnologia Agroalimentar pela Universidade Federal da Paraíba  
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos pela  
Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico

Endereço: Praça Santos Andrade, 50, prédio histórico da UFPR - Térreo, CEP: 80020-300, Centro, Curitiba – PR, Brasil

E-mail: anely-maciel@live.com

**Bruno Anderson de Moraes**

Licenciado em química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Barreiros

Endereço: Fazenda Sapé, S/N - Zona Rural - Barreiros/PE - CEP: 55560-000

E-mail: brunoanderson401@gmail.com

**Izaqueu Rodrigues da Silva**

Licenciado em química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Barreiros.

Endereço: Fazenda Sapé, S/N - Zona Rural - Barreiros/PE - CEP: 55560-000

E-mail: zaqueurs222@hotmail.com

**Neila Lidiany Ribeiro**

Doutora em Zootecnia pela Universidade Federal da Paraíba. Pesquisadora do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), Campina Grande, Paraíba, Brasil

Endereço: Av. Francisco Lopes de Almeida, S/N, Serrotão, CEP: 58434-700,

Município: Campina Grande-PB

E-mail: neilalr@hotmail.com

**Hofsky Vieira Alexandre**

Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande  
E-mail: hossky@gmail.com

**Oswaldo Soares da Silva**

Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande.  
Professor Associado I na Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos - CTRN da  
Universidade Federal de Campina Grande  
Endereço: Rua Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB, CEP: 58429-  
900 - Brasil  
E-mail: osvaldo\_so2002@yahoo.com.br; osvaldo@ccta.ufcg.edu.br

**RESUMO**

Objetivou-se avaliar a cinética de secagem das sementes da algaroba em camada fina e em diferentes temperaturas utilizando os modelos matemáticos semi empíricos de Henderson & Pabis, Lewis, Page, Cavalcanti Mata, Exponencial de Dois Termos e Midilli et al., para ajuste dos dados experimentais. A cinética de secagem foi realizada em triplicata utilizando uma estufa com circulação forçada de ar, com velocidade em torno de 1 m s<sup>-1</sup>, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e por tempos determinados até massa constante. Em todos os tratamentos, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram R<sup>2</sup> superior a 95,02% e valores de DQM inferiores a 0,0048. Dentre as equações testadas, as de Cavalcanti Mata, Midilli et al. e Page aproximaram-se mais dos pontos experimentais que os demais modelos utilizados. Os modelos de Cavalcanti Mata, Page e Midilli apresentaram os menores valores de DQM e melhores coeficientes estatísticos para descrever as curvas de secagem. Recomenda-se utilizar o modelo de Page para secagem de grãos de algaroba por possuir o menor número de termos, apresentar excelentes valores de R<sup>2</sup> e DQM, representar de forma eficiente as curvas de secagem para as diferentes temperaturas e ser de fácil aplicação.

**Palavras-chave:** curvas de secagem, energia de ativação, modelos matemáticos, *Prosopis juliflora*

**ABSTRACT**

The objective of this study was to evaluate the drying kinetics of mesquite seeds in a thin layer and at different temperatures using the semi-empirical mathematical models of Henderson & Pabis, Lewis, Page, Cavalcanti Mata, Exponential of Two Terms and Midilli et al., To adjust the experimental data. The drying kinetics was performed in triplicate using a forced air circulation oven, with speed around 1 m s<sup>-1</sup>, at temperatures of 50, 60 and 70 ° C and for determined times until constant mass. In all treatments, the mathematical models adjusted to the experimental data presented R<sup>2</sup> above 95.02% and DQM values below 0.0048. Among the tested equations, those of Cavalcanti Mata, Midilli et al. and Page were closer to the experimental points than the other models used. Cavalcanti Mata, Page and Midilli models presented the lowest DQM values and the best statistical coefficients to describe the drying curves. It is recommended to use the Page model for drying mesquite grains because they have the fewest terms, have excellent values for R<sup>2</sup> and DQM, represent the drying curves for different temperatures efficiently and are easy to apply.

**Keywords:** drying curves, activation energy, mathematical models, *Prosopis juliflora*

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo do processo de secagem fornece informações relativas ao comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem, normalmente o ar atmosférico, aquecido ou não; essas informações são fundamentais para a elaboração de projeto, e operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (SIQUEIRA et al., 2012).

A secagem dos produtos é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade de alguns materiais agrícolas, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008). De acordo com Shanthilal e Anandharamakrishnan (2013) a modelagem matemática baseada em resoluções empíricas é considerada um importante instrumento para processos de imersão, pois permite compreender o comportamento dos alimentos, prever resultados e auxiliar na qualidade cinética do processo de forma simples.

O estudo de cinética de secagem tem despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos, como grãos de milho (OLIVEIRA et al., 2012), grãos de guandu (SILVA et al., 2014), cevada (ALBINI et al., 2015) e sementes de melão (SILVA et al., 2018). A remoção de parte da água de um produto é importante para evitar contaminação pela proliferação de micro-organismos e manter a durabilidade e a qualidade do produto (SILVEIRA et al., 2013).

A algaroba que pertence à família Leguminosae (Mimosoidae), é uma espécie promissora para o Nordeste, tanto para fins madeireiros como forrageira dada a sua resistência a seca e boa adaptação às condições adversas. A algaroba pode ser utilizada na indústria onde é aproveitada na produção de álcool, bebidas (aguardente, licor, vinagre, café, mel e vinho). Da semente da algaroba também é extraída uma importante e valiosa matéria prima industrial (goma LGB e guar) um hidrocolóide usado na formulação de sorvetes, queijos, molhos, iogurtes, entre outros produtos (SILVA et al., 2012).

Devido à importância da algaroba pesquisas necessitam ser feitas para se descobrir mais sobre a sua potencialidade. É necessário criar protocolos de conservação,

um deles é a secagem dos grãos, um subproduto importante oriundo do processamento da vagem da algaroba.

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos agrícolas, o modelo teórico, os modelos semi teóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas e a limitação das informações teóricas a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem dos grãos da algaroba, objetivou-se neste trabalho avaliar a cinética de secagem das sementes da algaroba em camada fina nas temperaturas de 50, 60 e 70°C utilizando os modelos matemáticos de Henderson & Pabis, Lewis, Page, Cavalcanti Mata, Exponencial de Dois Termos e Midilli et al., para ajuste dos dados experimentais.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

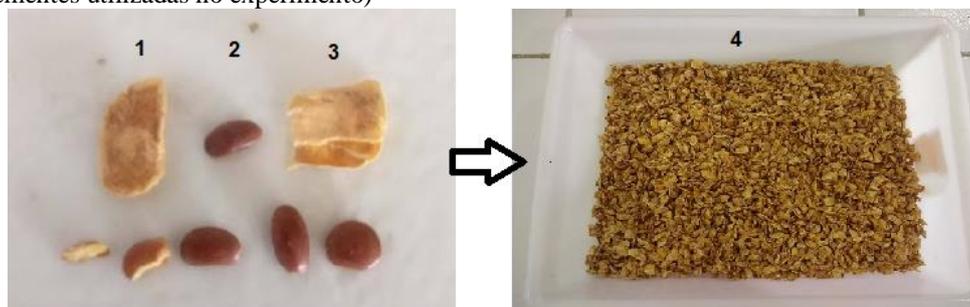
### 2.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

A secagem foi realizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, *Campus* Barreiros.

### 2.2 MATÉRIA-PRIMA

Foi utilizada a variedade da algaroba *Prosopis juliflora Sw. DC*, obedecendo ao critério de seleção *in loco*: estado de desenvolvimento de aproximadamente 24 meses obtidas na cidade de Afogados da Ingazeira/PE. Utilizou-se no experimento a semente da algaroba com a casca (Figura 1).

**Figura 1:** Imagens da semente da *Prosopis juliflora Sw. DC* ((1) Semente + casca, (2) Semente, (3) Casca e (4) sementes utilizadas no experimento)



Fonte: o autor (2020).

A obtenção dos grãos teve início com o processo de sanitização das vagens em solução de hipoclorito a 20 ppm por 10 minutos, seguido da imersão do material em água potável por 5 minutos e enxágue em água corrente. Após a sanitização, as vagens passaram por uma hidratação em água potável por 24 horas em temperatura ambiente (25°C) e posterior fragmentação em pedaços menores, seguida do despulpamento da vagem em liquidificador industrial. Após o despulpamento, o material (bagaço + semente) foi colocado em tanques/recipientes juntamente com água potável, na medida de 2:1 no volume, a fim de propiciar a flutuação das sementes, que foram obtidas por diferença de densidade com ajuda de peneiras (Figura 2). Os grãos foram armazenados sob congelamento na temperatura de -18°C, em sacos de propileno e em porções individuais de 300 g.

**Figura 2:** Representação do processo de obtenção dos grãos, (1) Sanitização e hidratação das vagens, (2) Fragmentação das vagens em liquidificador industrial, (3) Despulpamento das vagens, (4) hidratação da polpa + sementes + bagaço para favorecer a flutuação das sementes e a sua obtenção, (5) pesagem dos grãos e (6) Embalagem dos grãos.



Fonte: o autor (2020).

### 2.3 CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE ALGAROBA

A cinética de secagem foi realizada em triplicata (Figura 3) utilizando uma estufa (TECNAL, te 394/3 MP, São Paulo, Brasil) com circulação forçada de ar, e velocidade

do ar de secagem em torno de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , nas temperaturas de 50, 60 e  $70^\circ\text{C}$  até massa constante.

**Figura 3:** Telas utilizadas para a secagem das sementes



Fonte: o autor (2020).

O teor de umidade inicial e de equilíbrio foi determinado pelo método de secagem em estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por um período até massa constante, de acordo com a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2009).

Os dados obtidos na cinética de secagem foram submetidos aos dados experimentais expressos na forma de Razão de Teor de Água (RX) calculados pela Equação 1.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: RX - Razão de Teor de Água (adimensional),  $X_e$  - Teor de água de equilíbrio (base seca), X - Teor de água (base seca) e  $X_o$  - Teor de água inicial (base seca).

Os dados experimentais da secagem das sementes foram ajustados para os modelos matemáticos de Henderson & Pabis, Lewis, Page, Cavalcanti Mata, Exponencial de dois termos e Midilli et al., utilizados para ajuste matemático aos dados experimentais obtidos na secagem seguindo metodologia descrita na Tabela 1. Optou-se por utilizar modelos matemáticos que melhor se adequaram a cinética de secagem de grãos e outras sementes (CORZO et al., 2008; MIRANDA et al., 2009; SILVA et al., 2014). Os

coeficientes dessas equações foram obtidos mediante ajuste das curvas de secagem aos dados experimentais utilizando-se o software computacional Statistica, versão 7.0.

**Tabela 1.** Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem das sementes de algaroba

Modelo	Equação	Referência
Henderson & Pabis	$RX = a \exp(-Kt)$	Henderson e Pabis (1961)
Lewis	$RX = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
Page	$RX = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Cavalcanti Mata	$RX = a_1 \exp(-bt^{a_2}) + a_3 \exp(-bt^{a_4}) + a_3$	Carvalho (2007)
Exponencial de dois termos	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson (1974)
Midilli et al.	$RX = a \exp(-kt^n) + b t$	Midilli et al. (2002)

Onde: ( $RX$ ) Razão de umidade (adimensional); ( $t$ ) Tempo de secagem (min); ( $n$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  e  $a_5$ ) Constantes empíricas dos modelos de secagem; ( $Def$ ) Difusividade efetiva ( $m^2.s^{-1}$ ); ( $L$ ) Metade da espessura da amostra ( $m$ ) e ( $k$ ,  $k_0$  e  $k_1$ ) Coeficientes empíricos dos modelos de secagem ( $s^{-1}$ ) (adimensional).

Para o cálculo da difusividade efetiva ( $Def$ ) utilizou-se geometria de placa plana com espessura da amostra de 6,5 mm e utilizando a equação de Fick com quatro termos ( $n=4$ ) segundo a Equação 2 (CRANK, 1975).

$$RX = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} Def t\right] \quad (\text{Equação 2})$$

Como critério de seleção para o modelo que melhor representou o processo de secagem, foi considerado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio quadrático médio ( $DQM$ ), calculado por meio da Equação 3:

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{exp} - RX_{pre})^2}{N}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:  $DQM$  - Desvio Quadrático Médio;  $RX_{exp}$  - razão de água obtida experimentalmente;  $RX_{pre}$  - razão de água predita pelo modelo matemático e  $N$  - número de observações ao longo do experimento.

**3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As médias da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente durante o processo de secagem das sementes foram, respectivamente, de 29° C e 67%. Os valores médios de teor de água de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) obtidos para cada temperatura foram de 4,14, 2,94 e 2,11 % b.s. para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Dessa forma, pode-se notar que os valores de  $X_{eq}$  foram opostos ao aumento da temperatura de secagem, conforme o previsto e observado na algaroba (SILVA et al., 2012) e em outras matérias-primas, como no crambe (FARIA et al., 2012) e do feijão guandu (SILVA et al., 2014).

A influência da temperatura é muito significativa, pois à medida que esta aumenta, o tempo de secagem reduz. Há um aumento da pressão de vapor na amostra, acelerando a remoção de água do seu interior para a superfície, o que, por consequência, reduz os tempos de secagem (Aral & Beşe, 2016; Udomkun et al., 2015). A temperatura mais elevada produz uma maior força motriz para a transferência de calor e massa (NIAMNUY et al., 2011). Silva et al. (2014) afirma que a estabilidade do produto é atingida de acordo com teor de água de equilíbrio.

Na Tabela 2, encontram-se os valores estatísticos dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o desvio quadrático médio (DQM) para os modelos ajustados à cinética de secagem dos grãos de algaroba.

Em todos os tratamentos, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram  $R^2$  superior a 95,02% e valores de DQM inferiores a 0,0048. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que varia de 0 a 1, mostra a força da relação entre os dados observados e estimados (VIEIRA, 2012). Quando os modelos apresentam  $R^2$  superior a 91%, estes podem ser usados como equações de secagem que se ajustam satisfatoriamente aos dados experimentais (ALMEIDA, 2009). Resende et al. (2010), Costa et al. (2011), Silva et al. (2012), Silva et al. (2014) e Silva et al. (2018) que determinaram a secagem do feijão adzuki, sementes de crambe, grãos de algaroba, de guandu e sementes de melão, respectivamente, encontraram valores de  $R^2$  superiores a 98% constituindo uma representação satisfatória do fenômeno em estudo.

**Tabela 2.** Parâmetros de ajuste dos modelos matemáticos semi empíricos utilizados na predição da cinética de secagem das sementes de algaroba com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e Desvio Quadrático Médio (DQM)

Parâmetros									
Modelo Matemático	T°C	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	R <sup>2</sup>	DQM
Cavalcanti Mata	50	0,4941	0,0381	0,8002	0,9609	0,4167	-0,4515	0,9997	0,0070
	60	0,6753	0,0183	0,7485	0,3683	1,2335	-0,0213	0,9990	0,0133
	70	0,7941	0,0496	0,6418	0,2314	1,0263	-0,0230	0,9998	0,0048
Exponencial de dois termos	T°C	A		k		b		R <sup>2</sup>	DQM
	50	0,4109		0,006		0,4109		0,9739	0,0654
	60	0,4449		0,0087		0,4449		0,9795	0,0624
	70	0,4251		0,1185		0,4251		0,9818	0,0548
Henderson & Pabis	T°C	A		k				R <sup>2</sup>	DQM
	50	0,8219		0,0060				0,9739	0,0654
	60	0,8899		0,0087				0,9795	0,0624
	70	0,8502		0,0119				0,9818	0,0548
Lewis	T°C	k						R <sup>2</sup>	DQM
	50	0,0094						0,9502	0,0899
	60	0,011						0,9724	0,0723
	70	0,0159						0,9664	0,0742
Midilli et al.	T°C	a	k	n	b		R <sup>2</sup>	DQM	
	50	1,0223	0,0711	0,5536	0,000001		0,9985	0,0139	
	60	1,0574	0,0654	0,6024	-0,000001		0,9962	0,0267	
	70	1,0172	0,0826	0,5945	-0,000011		0,9992	0,0113	
Page	T°C	k		n				R <sup>2</sup>	DQM
	50	0,0654		0,5645				0,9986	0,0148
	60	0,0504		0,6442				0,9954	0,0295
	70	0,075		0,6137				0,9991	0,0120

Onde: ( $R^2$ ) coeficiente de determinação; (DQM) Desvio Quadrático Médio, e (a, A, k, n e b) parâmetros.

Dentre as equações utilizadas as de Cavalcanti Mata, Midilli et al. e Page aproximaram-se mais dos pontos experimentais que os demais modelos, constatado pelo valor do  $R^2$  que foi acima de 99% em todas as temperaturas avaliadas e também os menores valores do DQM. Sabe-se que quanto menor o valor do DQM melhor é a representação do modelo empregado. Mohapatra e Rao (2005) destacaram que o uso do  $R^2$  como único critério de seleção na avaliação de modelos matemáticos não se constitui em bom parâmetro para representação do fenômeno de secagem. Por isso a importância de se considerar o DQM.

De acordo com Resende et al. (2010), a seleção e recomendação do melhor modelo se fundamenta na simplicidade e no número de coeficientes. Neste trabalho e nas condições que ele foi realizado, o modelo que pode ser selecionado entre Cavalcanti Mata, Midilli e Page, o que melhor pode ser utilizado é o de Page, tendo por base, além dos coeficientes estatísticos favoráveis, a facilidade de uso e simplicidade do mesmo. A secagem em camada fina de diversos produtos tem sido representada pelo modelo de Page, como sementes de mamão (VENTURINI et al., 2012), massa fibrosa de mandioca (CASTIGLIONI et al., 2013), abacaxi (OLANIPEKUN et al., 2014), mandioca (TORREGROZA-ESPINOSA et al., 2014) e sementes de melão (SILVA et al., 2018).

Silva et al. (2012) estudando a cinética de secagem de grãos de algaroba observaram que os modelos matemáticos Cavalcanti Mata e Exponencial de dois termos apresentaram os maiores valores de  $R^2$ , e afirmaram que esses modelos foram os que melhor representaram o processo de secagem de algaroba nas temperaturas estudadas (40, 50, 60 e 70°C). Estas diferenças na recomendação dos modelos empíricos para os grãos de algaroba no trabalho de Silva et al. (2012) e no presente estudo, pode estar relacionada as condições de secagem e peculiaridades dos equipamentos utilizados.

No entanto, os outros modelos ajustados não podem ser usados para estimar as curvas de cinética de secagem de grãos de algaroba, em razão de terem apresentado DQM  $>0,05$ , mesmo com  $R^2 >0,96$  (DIÓGENES et al., 2013).

O parâmetro “k” dos modelos Exponencial de dois termos, Henderson & Pabis (1961), Lewis (1921), Midilli et al. (2002) e Page (1949) aumentaram com o aumento da temperatura de secagem. O valor de k tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem (GONELLI et al., 2009). O mesmo comportamento também foi constatado por Sousa et al. (2011), para os grãos de nabo forrageiro; Faria et al. (2012) para crambe, Siqueira et al. (2012), para pinhão manso e Diógenes et al. (2013) para grãos de abóbora.

No estudo com os grãos de algaroba Silva et al. (2012) observaram em grãos de algaroba que o valor do k diminui no modelo de Newton, e Dois termos, porém aumentou no Page a medida que a temperatura foi elevada. Faria et al. (2012) avaliaram sementes de crambe e observaram que o valor de k aumenta com o aumento da temperatura. Segundo Madamba et al. (1996), a constante de secagem k pode ser utilizada como uma

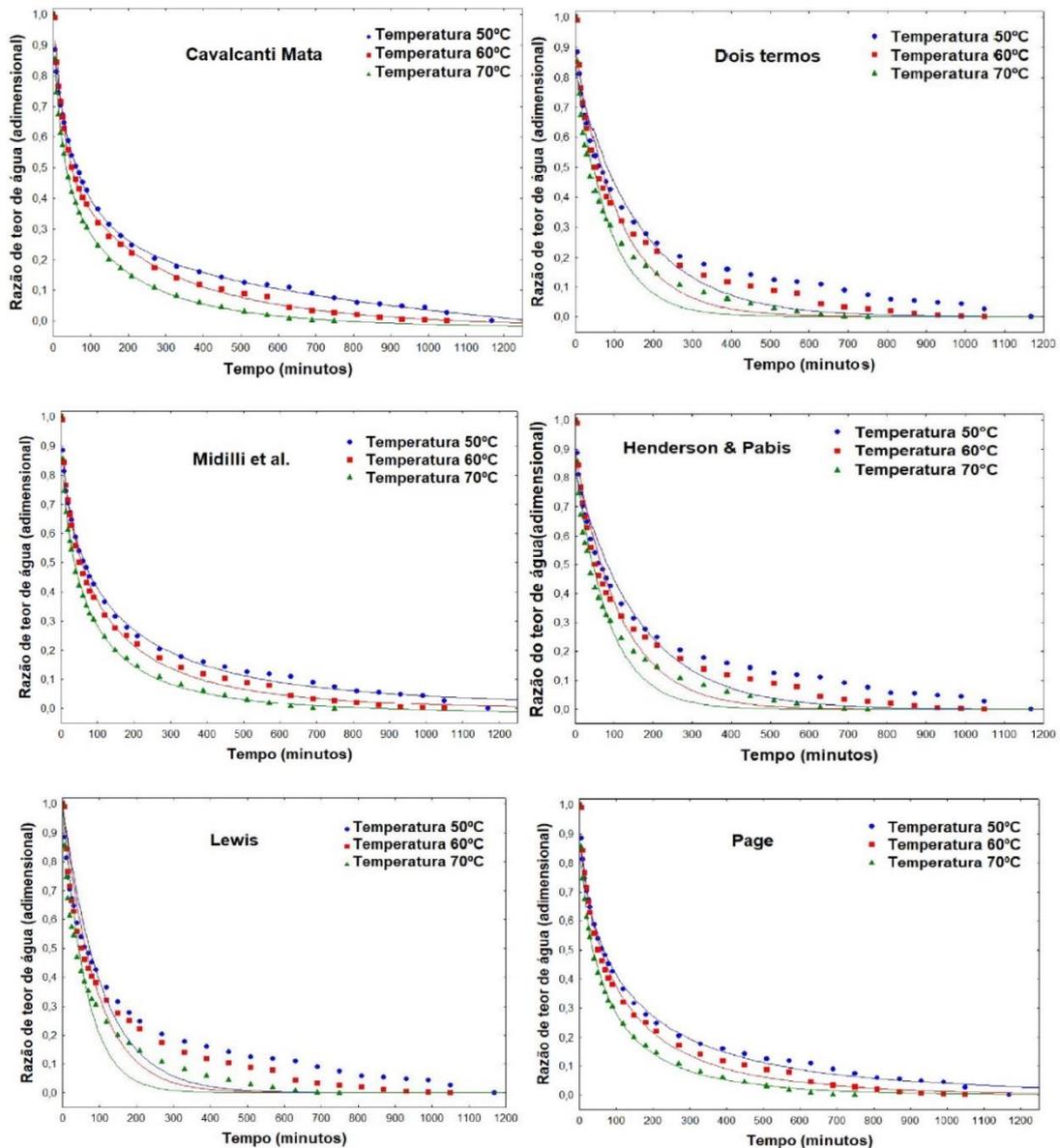
aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente.

Com relação ao coeficiente “n” do modelo de Page e Midilli et al. (2002), observou-se maiores valores na temperatura de 60°C voltando a diminuir na temperatura de 70°C. Normalmente, quanto maior com a elevação da temperatura do ar de secagem, menor é o valor de n, uma vez que há maior diferença entre a pressão do vapor do ar e do grão, promovendo maior remoção de água. Silva et al. (2012) estudando grãos de algaroba observaram que o valor de n foi maior na temperatura de 70 e 50 °C (0,770 e 0,754, respectivamente) e menores nas temperaturas de 40 e 60 °C (0,728 e 0,729, respectivamente) no modelo matemático de Page.

Calculando-se a Difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) obteve-se  $2,5088 \times 10^{-8}$ ,  $3,0724 \times 10^{-8}$  e  $4,6497 \times 10^{-8}$ , para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente. Verifica-se que o coeficiente de difusão efetiva de grãos de algaroba aumenta com o incremento da temperatura do ar de secagem concordando com Oliveira et al. (2012). Nota-se que o modelo linear representou satisfatoriamente os dados experimentais com alto coeficiente de determinação (98%). A difusividade depende da temperatura do ar de secagem, ou seja, quanto maior a temperatura do ar de secagem menor a resistência do grão a remoção da água, aumentando a difusividade. Os valores de difusão para grãos de algaroba forma inferiores aos citados na literatura para secagem de produtos agrícolas, que, segundo Madamba et al. (1996) apresenta-se na ordem de  $10^{-11}$  a  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Observou-se que com o aumento da temperatura houve diminuição no tempo de secagem. Comportamento semelhante foi observado por Silva et al. (2012) estudando cinética de secagem e grãos de algaroba. Através das curvas de secagem, verificou-se também que, para um mesmo tempo, quanto maior for à temperatura do ar, maior é a taxa de secagem e que a perda de água é mais rápida no início do processo, tendendo a se estabilizar em período de tempo superior aos 60 minutos. Martins et al. (2014) relataram que, no final da secagem, a água encontra-se em regiões mais intrínsecas da amostra, necessitando de maior energia para a sua evaporação. Assim, o processo ocorre mais lentamente resultando em menores valores da taxa de secagem. A cinética de secagem da algaroba está apresentada na forma adimensional do teor de água, em função do tempo na Figura 4, estando estas ajustadas aos modelos já descritos anteriormente.

**Figura 4:** Valores experimentais e estimados da razão do teor de água em função do tempo para a secagem dos grãos de algaroba de acordo com os modelos utilizados



Observa-se que o aumento da temperatura de 50°C para 60°C promoveu a diminuição da umidade em um tempo menor, pois ocorre um aumento na quantidade de energia térmica transferida do ar para o sólido, facilitando a transferência de umidade do sólido para o ar. Ocorre comportamento inverso entre a temperatura e o tempo necessário para a secagem, ou seja, uma redução no tempo de secagem e um aumento na remoção de água com a elevação da temperatura, conforme verificado também para outros produtos agrícolas (COSTA et al., 2011; DIÓGENES et al., 2013; MORAIS et al., 2013; MORAES FILHO et al., 2014).

**4 CONCLUSÕES**

Os modelos de Cavalcanti Mata, Page e Midilli apresentaram os melhores coeficientes estatísticos para descrever as curvas de secagem de grãos de algaroba em todas as temperaturas estudadas e dentre os modelos testados. Porém, o modelo de Page, por possuir o menor número de termos, apresentar excelentes valores de  $R^2$  e DQM, representar de forma eficiente as curvas de secagem para as diferentes temperaturas e ser de fácil aplicação, é recomendado para grãos de algaroba.

**REFERÊNCIAS**

ALBINI, G., PERAZZINI, H., FREIRE, F.B., FREIRE, J.T.. Secagem de grãos de cevada em camada fina: cinética de secagem. **Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXXVII ENEMP**. São Carlos – SP, On-Line, 2015.

ALMEIDA, D.P., RESENDE, O., COSTA, L.M., MENDES, U.C., SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v.2, p.72-83, 2009.

ARAL, S., & BEŞE, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, v. 210(1), p. 577-584, 2016.

BRASIL, 2009. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. 2009. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p.398, 2009.

CARVALHO, C. M., FIGUEIRÊDO, R. M. F., QUEIROZ, A. J. M., FREITAS, J. C. O., PAIVA, K. M. R., GONDIM, M. M. S. Secagem da polpa formulada de umbu-cajá. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36, 2007, Bonito-MS. **Anais [...]**. Bonito-MS: SBEA, CD Rom, 2007.

CASTIGLIONI, G.L., SILVA, F.A., CALIARI, M., SOARES JÚNIOR, M.S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 987-994, 2013.

COSTA, L. M., RESENDE, O., SOUSA, K. A., GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo para a secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 089-1096, 2011.

CORZO, O., BRACHO, N., PEREIRA, A., VÁSQUEZ, A., Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, p. 2023-2028, 2008.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Clarendon Press: Oxford, 1975.

DIÓGENES, A.M.G., QUEIROZ, A.J.M., FIGUEIREDO, R.M.F., SANTOS, D.C. Secagem de cinética de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, v. 26, p. 71-80, 2013.

FARIA, R.Q., TEIXEIRA, I.R., DEVILLA, I.A., ASCHERI, D.P.R., RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 57-583, 2012.

GONELI, A.L.D., CORRÊA, P.C., AFONSO JÚNIOR, P.C., OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 11, p. 64-73, 2009.

HENDERSON, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE, St. Joseph**, v. 17, p. 1167-1168, 1974.

HENDERSON, S.M., PABIS, S. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, p. 169-174, 1961.

LEWIS, W.K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, p. 427-433, 1921.

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(6), p. 1652-1660, 2014.

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

MIDILLI, A., KUCUK, H., YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, p. 1503-1513, 2002.

MIRANDA, M., MAUREIRA, H., RODRIGUEZ, K., VEJA-GALVEZ, A. Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) gel. **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 297-304, 2009.

MORAES FILHO, F.C., OLIVEIRA, E.L., NÓBREGA, E.M.M.A., OLIVEIRA, J.A., CORREIA, R.T.P. Secagem convectiva da acerola (*Malphigia marginata* DC.): aplicação de modelos semiteóricos. **HOLOS**, v.01, p. 86-95, 2014.

MORAIS, S.J.S., DEVILLA, I.A., FERREIRA, D.A., TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 455-463, 2013.

MOHAPATRA, D., & RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66(4), p. 513-518, 2005.

NIAMNUY, C., NACHAISIN, M., LAOHAVANICH, J., & DEVAHASTIN, S. Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions. **Food Chemistry**, v. 129(3), p. 899-906, 2011.

OLANIPEKUN, B.F., TUNDE-AKINTUNDE, T.Y., OYELADE, O.J., ADEBISI, M.G., ADENAYA, T.A. Mathematical modeling of thin-layer Pineapple drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2014.

OLIVEIRA, D.E.C., RESENDE, O., SMANIOTTO, T.A.S., CAMPOS, R.C., CHAVES, T.H. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, p. 190-201, 2012.

PAGE, G.E. Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer. 1949. Dissertation (Master's Thesis)- Department of Mechanical Engineering, **Purdue University**, Purdue, 1949.

RESENDE, O., CORRÊA, P.C., GONELI, A.L.D., BOTELHO, F.M., RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, p. 17-28, 2008.

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

SHANTHILAL, J., ANADHARAMAKRISHNAN, C. Computational and Numerical Modeling of Rice Hydration and Dehydration. **Food Science and Technology**, v. 31, 100-117, 2013.

SILVA, L.A., MATA, M.E.R.M., DUARTE, M.E. M., ALMEIA, R.D., PAULO, F.F. Drying kinetics of mesquite grain. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 14, p. 535-542, 2012.

## **Brazilian Journal of Development**

SILVA, L.M.M., SOUSA, F.C., SOUSA, E.P., MATA, M.E.R.M.C., DUARTE, M.E.M. Prediction models of kinetic drying of pigeon pea grains. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, p. 310-318, 2014.

SILVA, I.L., HELLISMAR, W.S., CARMARGO, F.R.T., FARIAS, H.F.L., FREITAS, E.F.M. Druing and diffusivity of melon seeds. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, p. 309-315, 2018.

SILVEIRA, A. C.P.; PERRONE, I.T.; RODRIGUES JÚNIOR, P.H.; CARVALHO, A.F. Secagem por spray: Uma revisão. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Toste**, v. 68, n. 391, p. 51-58, 2013.

SIQUEIRA, V.C., RESENDE, O., CHAVES, T.H. Drynkinetics of jatropha seeds. **Revista Ceres**, v. 59, p. 171-177, 2012.

SOUSA, K.A., RESENDE, O., CHAVES, T.H., COSTA, L. M.. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 83-892, 2011.

TORREGOZA-ESPINOSA, A.M., MONTES-MONTES, E.J., ÁVILA-GÓMEZ, A.E., REMOLINA-LOPEZ, J.F. Kinetic modelling of drying of three varieties of yucca industrial. **DYNA**, v. 81; p. 184-192, 2014.

UDOMKUN, P., ARGYROPOULOS, D., NAGLE, M., MAHAYOTHEE, B., JANJAI, S., & MÜLLER, J. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. **Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie**, v. 64(1), p. 67-73, 2015.

VALENTAS, K.J., ROTSTEIN, E., SINGH, R.P. **Handbook of food engineering practice**. Boca Raton: CRC Press, 1997.

VENTURINI, T., BENCHIMOL, L.R., BERTUOL, D.A., ROSA, M.B., MEILI, L.,. Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (*Caricacapaya L.*). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 5, p. 950-959, 2012.

VIEIRA, G.N.A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum L.*) em leito fixo e fluidizado**. 2012. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2012.