

CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE MILHO

DANIEL EMANUEL CABRAL DE OLIVEIRA¹, OSVALDO RESENDE²,
THAÍAS ADRIANA DE SOUZA SMANIOTTO¹, RAFAEL CÂNDIDO CAMPOS³
e TARCÍSIO HONÓRIO CHAVES³

¹Mestrando em Ciências Agrárias, IF Goiano (Campus Rio Verde), Rio Verde, GO, Brasil, oliveira.d.e.c@gmail.com, tatiadris@ig.com.br

²Doutor em Engenharia Agrícola, IF Goiano (Campus Rio Verde), Rio Verde, GO, Brasil, osvresende@yahoo.com.br

³Graduando em Agronomia, IF Goiano (Campus Rio Verde), Rio Verde, GO, Brasil, rcandido30@gmail.com, tarcisiohonoriochaves@ymail.com

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.11, n.2, p. 190-201, 2012

RESUMO - Os objetivos deste trabalho foram ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem dos grãos de milho (*Zea mays* L.), determinar e avaliar o coeficiente de difusão efetivo, bem como obter a energia de ativação para o processo durante a secagem em diversas condições de ar. O experimento foi desenvolvido no IF Goiano (Campus Rio Verde). Os grãos de milho da cultivar AG 7088, com teor de água inicial de 0,235 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca) foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 40, 55, 70, 85 e 100 °C, até atingirem o teor de água de 0,149 ± 0,009 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). Dentre os modelos analisados, o de Newton apresentou o melhor ajuste para descrever o fenômeno de secagem. O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de milho aumentou com a elevação da temperatura do ar e a relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem do milho de 19,09 kJ mol⁻¹.

Palavras-chave: difusividade líquida, modelagem matemática, Newton, *Zea mays* L.

DRYING KINETICS OF MAIZE

ABSTRACT - The aim of this work was adjust different mathematical models to experimental data of drying maize (*Zea mays* L.), determine and evaluate the effective diffusion coefficient, and obtain the activation energy for the process during the drying air in various conditions. The experiment was carried out at IF Goiano (Campus Rio Verde). The grains of maize cultivar AG 7088 with an initial moisture content of 0.235 (kilogram of water per kilogram of dry matter) were subjected to drying in an oven with forced air ventilation in five temperature conditions: 40, 55, 70, 85 and 100 °C, until they reach the moisture content of 0.149 ± 0.009 (kilogram of water per kilogram of dry matter). Among the ten models analyzed, the model of Newton presented the best fit to describe the drying phenomena. The effective diffusion coefficient of maize increased with increased air temperature and the ratio of effective diffusion coefficient and the drying temperature can be described by the Arrhenius equation, which has an activation energy for liquid diffusion in drying maize 19.09 kJ mol⁻¹.

Key words: liquid diffusivity, mathematical modeling, Newton, *Zea mays* L.

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura originária da América Central, cultivado em grande parte do mundo e sua importância econômica é evidenciada pelas diversas formas de utilização, desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia.

A secagem dos produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as alterações químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (Resende et al., 2008).

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, são relevantes a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (Berbert et al., 1995). A utilização de modelos matemáticos nas simulações das operações de secagem tem auxiliado o projeto, o desenvolvimento, a avaliação e a otimização de secadores (Palacin et al., 2005). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, necessita-se da utilização de um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, a perda de água durante o período de secagem (Giner & Mascheroni, 2002).

O estudo de simulação da secagem de grãos sob condições externas constantes, para determinado tempo de processamento, pode ser dividido em dois grupos principais: modelos teóricos e empíricos (Beker et al., 1997). Os modelos teóricos consideram a resistência interna e a transferência de calor e massa entre o produto e o ar quente. Já os empíricos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de

secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de massa no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (Resende et al., 2009).

A água pode movimentar-se no interior do material por mecanismos diferentes. Em produtos capilares porosos, como a maioria dos produtos agrícolas, os possíveis mecanismos de transporte de água são: difusão líquida; difusão capilar; difusão na superfície; fluxo hidrodinâmico; difusão de vapor; e difusão térmica (Martinazzo et al., 2007).

A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (Goneli et al., 2007).

Pode-se dizer que a difusividade é a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, e por isto não é intrínseca ao material, convencionou-se chamá-la, então, de difusividade efetiva (Oliveira et al., 2006). O coeficiente de difusão efetivo pode ser usado quando os grãos são considerados materiais homogêneos (Iguaz et al., 2003).

Inúmeros trabalhos têm sido realizados com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem, como: nabo forrageiro (Sousa et al., 2011); crambe (Costa et al., 2011); espiga de milho (Corrêa et al., 2011); clones de café (Resende et al., 2009); e feijão (Corrêa et al., 2007).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, o objetivo deste trabalho foi ajustar diferentes modelos

matemáticos aos dados experimentais da secagem de grãos de milho e determinar o coeficiente de difusão efetivo, bem como obter a energia de ativação para o processo durante a secagem em diversas condições de ar.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - *Campus* Rio Verde (IF Goiano, *Campus* Rio Verde), com grãos de milho cultivar AG 7088 procedentes de Rio Verde, GO, Brasil, com teor de água inicial 0,235 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). Os grãos foram submetidos à secagem em estufa, com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 40, 55, 70, 85 e 100 °C, que promoveram as umidades relativas de 22,4; 9,2; 4,2; 2,9 e 1,0%, respectivamente. A secagem prosseguiu até que os grãos atingissem o teor de água de 0,149 ± 0,009 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), determinado em estufa a 103 ± 1 °C, durante 72 h, em três repetições (ASAE, 2000).

A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto até atingir o teor de água desejado. O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi realizado com auxílio de uma balança com resolução de 0,01 g.

As temperaturas do ar ambiente e do ar de secagem foram monitoradas por meio de um termômetro instalado na parte interna e externa da estufa, sendo a umidade relativa no interior da estufa obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, utilizando o programa computacional GRAPSI (Melo et al., 2004).

Para a determinação das razões de teor de água dos grãos de milho durante a secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

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

em que:

RX: razão de teor de água do produto, adimensional;
X: teor de água do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca);

X_i: teor de água inicial do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca); e

X_e: teor de água de equilíbrio do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Para obter o teor de água de equilíbrio dos grãos de milho em cada temperatura, foram utilizadas três bandejas contendo 50 g cada, em uma estufa de ventilação forçada. As bandejas contendo o produto permaneceram na estufa até que a sua massa permanecesse invariável durante três pesagens consecutivas em intervalos de 24 h, sendo o teor de água final determinado em estufa a 103 ± 1 °C, durante 72 h, em três repetições (ASAE, 2000).

Aos dados experimentais da secagem dos grãos de milho foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas, conforme apresentação na Tabela 1.

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando um programa estatístico. Os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação (R²), do teste de qui-quadrado (χ²), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE). Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como

um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra & Rao (2005).

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \tag{12}$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \tag{13}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \tag{14}$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

N: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

O modelo da difusão líquida para a forma geométrica de placa plana, com aproximação de oito termos (Equação 15), foi ajustado aos dados experimentais de secagem dos grãos de milho, considerando a área superficial e o volume, de acordo com a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n_i=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n_i + 1)^2} \cdot \exp \left[-\frac{(2 \cdot n_i + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{S}{V}\right)^2 \right] \tag{15}$$

Em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

n_i : número de termos;

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	
$RX = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Sing	(2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma	(3)
$RX = \exp \left(\frac{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}}{2 \cdot b} \right)$	Thompson	(4)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(5)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(6)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(7)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(8)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de Dois Termos	(9)
$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois Termos	(10)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação da Difusão	(11)

Em que, t : tempo de secagem, h; k, k_0 , k^1 : constantes de secagem h⁻¹; e a, b, c, n: coeficientes dos modelos.

S: área da superfície do produto, m²; e
V: volume do produto, m³.

A área superficial (S) dos grãos de milho foi obtida utilizando os eixos ortogonais de acordo com a expressão:

$$S = \pi \cdot D_g \quad (16)$$

$$D_g = (A \cdot B \cdot C)^{1/3} \quad (17)$$

D_g: diâmetro geométrico médio.

O volume dos grãos de milho foi obtido de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_g = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (18)$$

Em que:

V_g: volume dos grãos, mm³;

A: comprimento, mm;

B: largura, mm; e

C: espessura, mm.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita por meio da equação de Arrhenius.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{ab}}\right) \quad (19)$$

Em que:

D₀: fator pré-exponencial;

E_a: energia de ativação, kJ mol⁻¹;

R: constante universal dos gases, 8,134 kJ kmol⁻¹ K⁻¹;

e

T_{ab}: temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius foram linearizados com a aplicação do logaritmo na seguinte forma:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{ab}} \quad (20)$$

Resultados e Discussão

Na Tabela 2, estão os valores médios de razão de teor de água dos grãos de milho submetidos à secagem em diferentes condições de ar, pelos quais verifica-se que o tempo necessário para que os grãos atingissem o teor de água de 0,149 ± 0,009 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca) foi de 5,13; 3,38; 2,37; 1,67 e 1,65 h para as temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C, respectivamente, evidenciando que o aumento da temperatura do ar promove redução no tempo de secagem dos grãos.

Além disso, nota-se que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, conforme observado por diversos pesquisadores para diferentes produtos agrícolas (Sousa et al., 2011; Resende et al., 2009; Resende et al., 2008). Ainda na Tabela 2, nota-se que o valor de razão de teor de água diminui rapidamente, com consequente aumento da temperatura.

Na Tabela 3, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os dez modelos analisados para a descrição da cinética de secagem dos grãos de milho submetidos à secagem em diferentes condições de temperatura. Nota-se que todos os modelos matemáticos apresentaram coeficientes de determinação (R²) superiores a 99,7%, indicando, segundo Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do processo de secagem.

TABELA 2. Razão de teor de água (RX, decimal) dos grãos de milho AG 7088 ao longo do tempo (h).

Temperatura (°C)									
40		55		70		85		100	
RX	Tempo	RX	Tempo	RX	Tempo	RX	Tempo	RX	Tempo
1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00
0,9009	1,02	0,9196	0,57	0,9214	0,42	0,9280	0,27	0,9197	0,20
0,8205	1,82	0,8537	0,93	0,8583	0,73	0,8549	0,50	0,8460	0,52
0,7587	2,75	0,7859	1,43	0,7870	1,12	0,7881	0,78	0,7644	0,83
0,6666	3,80	0,7185	1,98	0,7246	1,48	0,7249	1,02	0,6922	1,15
0,5910	5,13	0,6467	2,65	0,6740	1,85	0,6687	1,30	0,6340	1,40
-	-	0,5919	3,38	0,5921	2,37	0,6043	1,67	0,5869	1,65

Verifica-se também que os dez modelos apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10% para as cinco condições testadas, indicando, de acordo com Mohapatra & Rao (2005), serem adequados para representação do fenômeno.

Com relação ao SE, todos os modelos apresentaram valores baixos, próximos a zero, sendo

relevantes para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. De acordo com Draper & Smith (1981), a capacidade de um modelo representar adequadamente um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado.

TABELA 3. Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal $\times 10^{-3}$) para os modelos analisados, durante a secagem dos grãos de milho da cultivar AG 7088 nas diversas condições de temperatura (°C).

Modelo	Temperatura (°C)														
	40			55			70			85			100		
	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2
2	6,4	0,55	99,86	5,4	0,40	99,89	3,3	0,30	99,96	4,4	0,38	99,92	8,2	0,52	99,76
3	6,7	0,64	99,84	4,5	0,25	99,92	3,0	0,24	99,96	5,1	0,48	99,89	5,2	0,50	99,91
4	6,5	0,59	99,85	6,8	0,58	99,82	5,5	0,50	99,88	5,0	0,45	99,89	7,7	0,55	99,79
5	6,6	0,62	99,84	7,8	0,73	99,77	3,0	0,28	99,96	5,1	0,48	99,89	7,0	0,59	99,83
6	6,0	0,64	99,84	8,1	0,91	99,70	5,0	0,50	99,88	4,7	0,48	99,89	7,3	0,42	99,77
7	7,4	0,59	99,85	6,6	0,52	99,86	3,6	0,31	99,96	5,0	0,38	99,91	7,6	0,51	99,84
8	6,7	0,66	99,84	8,7	0,92	99,71	4,6	0,44	99,92	5,1	0,50	99,89	6,8	0,53	99,84
9	6,5	0,59	98,85	6,7	0,57	99,82	3,2	0,29	99,96	5,0	0,45	99,90	7,7	0,54	99,91
10	9,5	0,66	99,84	11,2	0,92	99,71	3,8	0,24	99,96	6,4	0,45	99,93	6,6	0,50	99,79
11	6,7	0,64	99,84	8,8	0,91	99,70	5,5	0,50	99,88	5,1	0,48	99,89	8,0	0,42	99,77

Na Tabela 4, estão apresentados os valores do teste de qui-quadrado obtidos para os diferentes modelos ajustados às curvas de secagem dos grãos de milho. Os dez modelos analisados apresentaram valores relevantes de qui-quadrado, sendo menores que o qui-quadrado tabelado, que variou de 5,991 a 12,592. Segundo Günhan et al. (2005), quanto menor o valor do qui-quadrado, melhor o ajuste do modelo. Assim, de uma maneira geral, os modelos de Newton (6), Verma (3), Page (5) e Wang & Sing (2) apresentaram os menores valores de qui-quadrado.

De acordo com a análise dos parâmetros estatísticos, verifica-se que todos os modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. Entretanto, o modelo de Newton foi selecionado para representar

o fenômeno de secagem do milho devido à sua simplicidade de aplicação.

Vitorino (2009), estudando secagem de grãos de milho da variedade DKB 979 em camada delgada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com teor de água de 0,35 a 0,11 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), verificou que o modelo de Newton representa satisfatoriamente a cinética de secagem desta variedade.

Na Tabela 5, estão apresentados os valores do coeficiente “k” do modelo de Newton ajustado aos dados experimentais da cinética de secagem dos grãos de milho em diferentes temperaturas.

Analisando os resultados, observa-se que a magnitude da constante de secagem k para o modelo de Newton, que representa o efeito das condições

TABELA 4. Valores para o teste de qui-quadrado calculados para os dez modelos utilizados na representação da cinética de secagem dos grãos de milho da cultivar AG 7088.

Modelos	Temperatura (°C)				
	40	55	75	85	100
2	0,000041	0,000029	0,000011	0,0000197	0,00007
3	0,000045	0,000021	0,000009	0,0000263	0,00003
4	0,000042	0,000047	0,000031	0,0000248	0,00006
5	0,000043	0,000061	0,000009	0,0000263	0,00005
6	0,000036	0,000065	0,000025	0,0000220	0,00005
7	0,000056	0,000044	0,000013	0,0000246	0,00006
8	0,000045	0,000076	0,000021	0,0000259	0,00005
9	0,000042	0,000046	0,000010	0,0000248	0,00006
10	0,000090	0,000127	0,000015	0,0000413	0,00004
11	0,000045	0,000078	0,000031	0,0000263	0,00006

TABELA 5. Coeficiente do modelo de Newton ajustado para as diferentes condições de secagem dos grãos de milho AG 7088, com a respectiva equação em função da temperatura.

Coeficiente	Temperatura (°C)					Equação
	40	55	70	85	100	
K	0,1039**	0,1618**	0,2161**	0,3072**	0,3240**	k = 0,0039T - 0,0507

**Significativo a 1% pelo teste F

externas de secagem, aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem.

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.

Na Figura 1, estão apresentadas as curvas de secagem dos grãos de milho estimadas pelo modelo de Newton. Verifica-se o ajuste satisfatório do modelo aos valores experimentais obtidos ao longo da secagem dos grãos de milho.

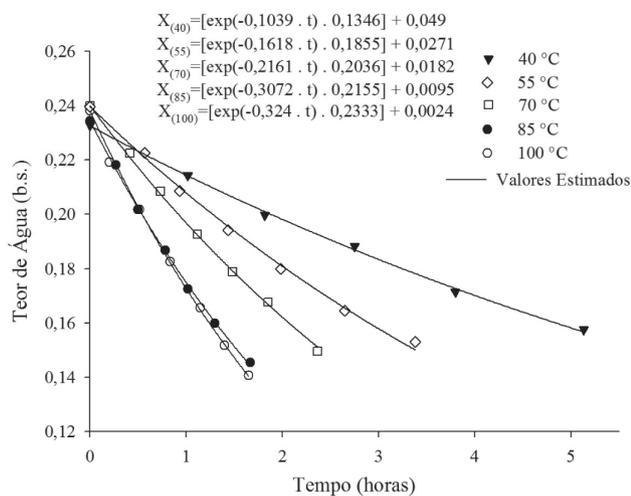


FIGURA 1. Valores do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Newton para a secagem dos grãos de milho nas diversas condições de temperatura.

Na Figura 2, estão apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo para os grãos de milho, considerando a área superficial e o volume, após a secagem em diferentes condições de ar. Verifica-se que o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de milho aumenta com o incremento da temperatura do

ar de secagem, concordando com resultados obtidos por outros pesquisadores (Goneli et al., 2007; Gely & Santalla, 2007; Resende et al., 2008).

Nota-se que o modelo linear representou satisfatoriamente os dados experimentais, com alto coeficiente de determinação (97,64%). A difusividade depende da temperatura do ar de secagem, ou seja, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor a resistência do grão à remoção de água, aumentando a difusividade.

Os coeficientes de difusão efetivos dos grãos de milho apresentaram magnitudes entre $1,54 \times 10^{-13}$ a $4,85 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, valores próximos aos encontrados por Gely & Santalla (2007) para sementes de quinoa, $1,18 \times 10^{-12}$ e $6,76 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, em temperaturas de 30 e 90 °C. Já Sacilik (2007) e Goneli et al. (2007) encontraram magnitudes de $8,53 \times 10^{-11}$ a $17,52 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $8,3306 \times 10^{-11}$ e $41,0977 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o coeficiente de difusão das sementes de abóbora e grãos de trigo, respectivamente.

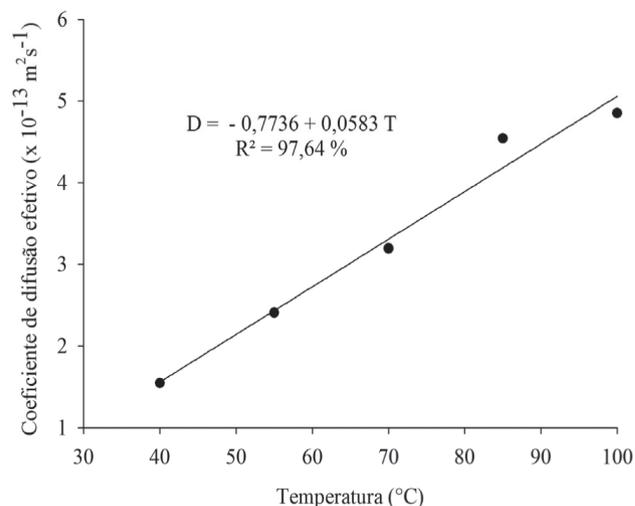


FIGURA 2. Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem dos grãos de milho AG 7088 nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Os valores dos coeficientes de difusão efetivo para os grãos de milho da cultivar AG 7088 foram inferiores aos citados na literatura para secagem de produtos agrícolas, que, segundo Madamba et al. (1996), apresentam-se na ordem de 10^{-11} a 10^{-9} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. Esses valores menores encontrados no milho podem ser devidos à sua composição química, sendo a cultura rica em carboidrato, lembrando que, para secar o produto, a água presente nos grãos deve passar pelas camadas dos diferentes tecidos celulares que as formam, isto é, dependendo da composição química dessas camadas, o produto apresenta diferentes características com o meio. Frisando que Gely & Santalla (2007) encontraram valores semelhantes para a quinoa, que também possui alto valor de carboidratos totais.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de milho com relação à temperatura

do ar de secagem foi representada pela expressão de Arrhenius, conforme ilustrado na Figura 3.

A energia de ativação para o fenômeno de secagem do milho foi de $19,09 \text{ kJ mol}^{-1}$ para a faixa de temperatura estudada. Segundo Zogzas et al. (1996), a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre $12,7$ a 110 kJ mol^{-1} . Assim, o valor obtido no presente trabalho encontra-se dentro desta faixa.

Como a energia de ativação indica a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto (Corrêa et al., 2007).

Na literatura, encontram-se valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas: para mamona, de $15,25 \text{ kJ mol}^{-1}$ na faixa de temperatura de 25 a $55 \text{ }^\circ\text{C}$ (Goneli, 2008); quinoa, $37,97 \text{ kJ mol}^{-1}$ para

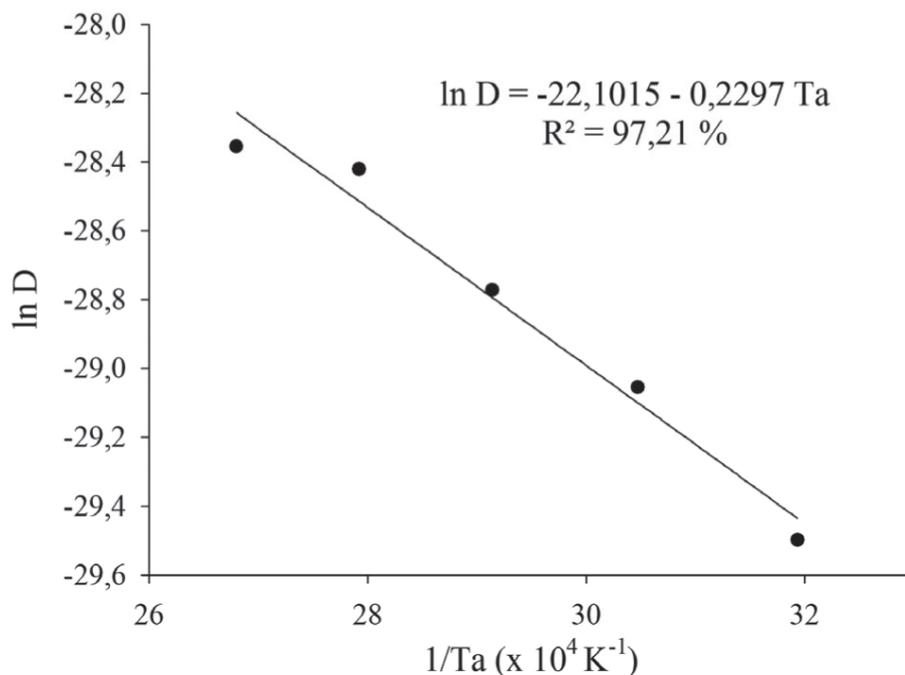


FIGURA 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem dos grãos de milho AG 7088.

temperaturas de 30 e 90 °C (Gely & Santalla, 2007); crambe, 37,07 kJ mol⁻¹ para temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C (Costa et al., 2011).

Vitorino (2009), estudando secagem de grãos de milho da variedade DKB 979, verificou que a energia de ativação foi de 31,54 kJ mol⁻¹. Já Corrêa et al. (2011), estudando secagem de milho em espiga da variedade UFV-100 nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C e teor de água de 0,45 a 0,12 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), verificaram que a energia de ativação foi de 17,64 kJ mol⁻¹.

Na Figura 4, está apresentada a influência da temperatura na constante de secagem (k) do modelo de Newton, descrita por meio da representação de Arrhenius.

A energia de ativação para o fenômeno de secagem do milho com base nos dados estimados pelo

modelo de Newton foi de 19,05 kJ mol⁻¹, valor este próximo ao obtido para a energia de ativação do coeficiente de difusão efetivo, 19,09 kJ mol⁻¹, demonstrando que a constante k está diretamente relacionada à difusividade de água nos grãos.

Conclusões

O modelo de Newton apresenta o melhor ajuste para descrever o fenômeno da secagem dos grãos de milho AG 7088 devido à sua maior simplicidade quando comparado aos demais modelos analisados.

O coeficiente de difusão efetivo para os grãos de milho aumenta com a elevação da temperatura do ar durante a secagem, sendo descrito pela equação de Arrhenius, apresentando uma energia de ativação de 19,09 kJ mol⁻¹.

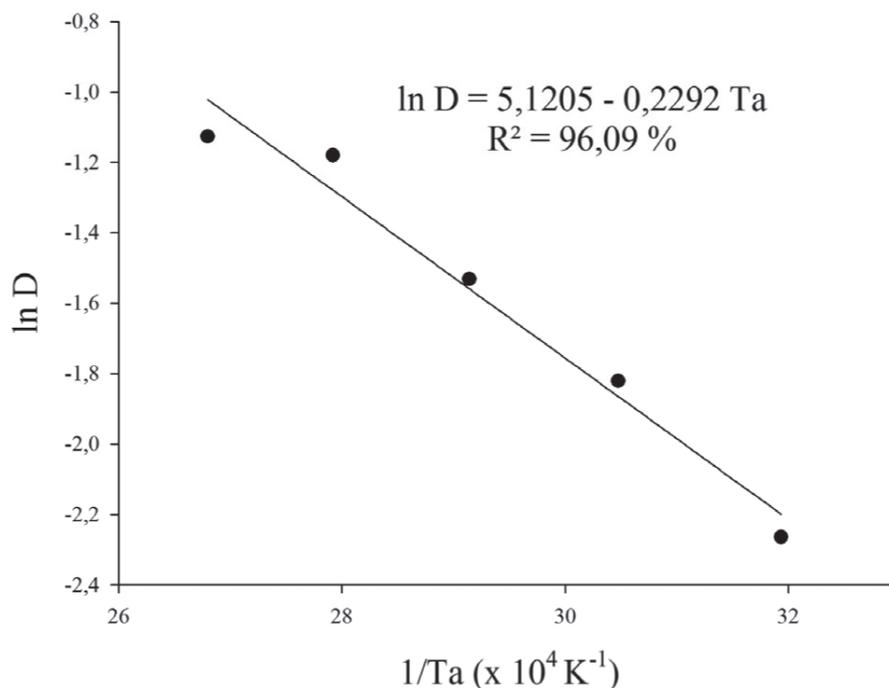


FIGURA 4. Representação de Arrhenius para a constante de secagem k do modelo de Newton durante a secagem dos grãos de milho AG 7088.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Moisture measurement** - Unground grain and seeds. St. Joseph, 2000. p. 563. (ASAE S352.2)
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, n. 3, p. 167-173, 1995.
- BEKER, J.; MUJUMDAR, A. S.; GIROUX, M. Some fundamental attributes of corn and potato drying in microwave fields. **Drying Technology**, New York, v. 15, n. 2, p. 539-554, 1997.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO A. P.; GONELI, A. L. G.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. G.; RESENDE, O.; CAMPOS, S. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.
- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**, 3ª ed., New York: John Wiley and Sons, 1998. 712p.
- GELY, M. C.; SANTALLA, E. M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **Journal of Food Engineering**, London, v. 78, n. 3, p. 1029-1033, 2007.
- GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H. Diffusive drying kinetics in wheat, part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Biosystems Engineering**, Oxford, v. 81, n. 1, p. 85-97, 2002.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.
- GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 186 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GÜNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, St. Louis, v. 46, n. 11-12, p. 1667-1679, 2005.
- IGUAZ, A.; SAN MARTIN, M. B.; MATÉ, J. I.; FERNANDEZ, T.; VÍRSEDA, P. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido cultivar*) at low drying temperatures. **Journal of Food Engineering**, London, v. 59, n. 2-3, p. 253-258, 2003.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.
- MELO, E. C.; LOPES, D. C.; CORRÊA, P. C. Grapsi - programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, MG, v. 12, n. 2, p. 154-162, 2004.

- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach, 1986. 841 p.
- OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006.
- PALACIN, J. J. F.; LACERDA FILHO, A. F.; CECON, P. R.; MONTES, E. J. M. Determinação das curvas de secagem de milho nas espigas (*Zea mays* L.). **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 4, p. 300-313, 2005.
- 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**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.
- RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.
- SACILIK, K. Effect of drying methods on thin layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, London, v. 79, n. 1, p. 23-30, 2007.
- SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.
- VITORINO, R. B. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho**. 2009. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.