

CINÉTICA DE SECAGEM E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO DE GRÃOS DE SORGO

FERNANDO MENDES BOTELHO¹, TAISE RAQUEL BECHLIN GARCIA²,
JÉSSICA LIMA VIANA², SÍLVIA DE CARVALHO CAMPOS BOTELHO³,
ADEMIR MARCELO BRITO DE SOUSA²

¹Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, UFMT, Sinop, MT - Brasil, fernando_eaa@yahoo.com.br

²UFMT, Sinop, MT, Brasil, tayse_raquel@hotmail.com, jessica_llivia@hotmail.com, ademir570@hotmail.com

³Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT, Brasil, silvia.campos@embrapa.br

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.14, n.2, p. 260-272, 2015

RESUMO - Objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem de sorgo (*Sorghum bicolor*), selecionando aquele que melhor represente o fenômeno. Além disso, determinaram-se o coeficiente de difusão efetivo e algumas propriedades termodinâmicas associadas à secagem. Foram utilizadas duas cultivares de sorgo, BRS 308 e NIDERA A 9721. A secagem do sorgo foi realizada em uma estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. Os coeficientes de difusão foram obtidos por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, baseado na segunda lei de Fick, aos dados experimentais da secagem dos grãos de sorgo. Baseando-se na dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura, obteve-se ainda a energia de ativação e, por meio desta, a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs de ativação. Verificou-se que, dentre os modelos analisados, o de Midilli apresentou o melhor ajuste para descrever o fenômeno de secagem das duas cultivares utilizadas. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo os valores sempre maiores para a cultivar BRS 308. A energia de ativação, assim como as demais propriedades termodinâmicas analisadas, foi semelhante para as duas cultivares.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*, teor de água, modelos matemáticos.

DRYING KINETICS AND DETERMINATION OF EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT OF SORGHUM GRAINS

ABSTRACT - The objective of the present work was to adjust different mathematical models to experimental data of sorghum drying (*Sorghum bicolor*), selecting the one that best represents the phenomenon. Furthermore, the effective diffusion coefficient and some thermodynamic properties associated to drying were determined. Two cultivars of sorghum were used, BRS 308 and NIDERA A 9721. The drying of sorghum was conducted in an oven with forced air at temperatures of 40, 50 and 60°C. The diffusion coefficients were obtained by fitting the mathematical model of liquid diffusion, based on Fick's second law, to experimental data of sorghum drying. Based on the dependence of the effective diffusion coefficient with temperature, the activation energy was obtained, and through that, the enthalpy, entropy and Gibbs free energy of activation. Based on the proposed statistical tests, for the conditions in the experiment, it was verified that among the models analyzed the Midilli's model showed the best adjustment to describe the drying phenomena of the two varieties used. The effective diffusion coefficient increased with the rise in drying air temperature, with the highest values for BRS 308 cultivars. The activation energy as well as other thermodynamic properties analyzed were similar for both varieties.

Key words: *Sorghum bicolor*, water content, mathematical models.

O sorgo está entre os cinco cereais mais cultivados no mundo, sendo precedido pelo arroz, trigo, milho e cevada. Esta posição se deve ao fato de a cultura apresentar características vantajosas quando comparada a outros produtos, como o fato de ser mais resistente a estresses ambientais, se adaptar a uma gama de ambientes, principalmente sob condições de deficiência hídrica, desfavoráveis à maioria dos outros cereais. Esta característica permite que a cultura seja apta para desenvolvimento e expansão em regiões de cultivo com distribuição irregular de chuvas e em sucessão a culturas de verão. Além disso, o sorgo é uma cultura de diferentes aplicações, podendo ser utilizado tanto na produção de silagem, biomassa, álcool ou grão.

A qualidade dos grãos de sorgo, bem como a dos demais produtos agrícolas, é função dos fatores pré-colheita, da colheita propriamente dita e da pós-colheita. Na fase de pós-colheita, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos produtos agrícolas, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica na massa de grãos, e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento.

A simulação e as informações teóricas, relacionadas com as alterações físicas, químicas e fisiológicas observadas em cada produto durante a remoção de água, são de grande importância para o estudo de sistemas de secagem, desenvolvimento e otimização de equipamentos, tendo em vista a sua viabilidade comercial. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que represente satisfatoriamente a perda de água do produto durante o processo (Berbert et al., 1995).

O processo de secagem em camada delgada tem por objetivo a determinação das taxas de secagem dos produtos agrícolas, utilizando para a coleta de dados o registro das perdas de massa ocorridas durante o processo de remoção de água (Monte et al., 2008).

Pesquisas relacionadas ao estudo da cinética de secagem em camada delgada são realizadas com diversos produtos agrícolas, como grãos, frutos, sementes e em algumas espécies de plantas com importância econômica, sendo observado que, conforme o produto e as condições do processo de secagem, diferentes modelos se ajustam a cada situação (Martinazzo et al., 2007).

A obtenção e modelagem das curvas de secagem de um determinado produto possibilitam determinar índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, que são fundamentais para o dimensionamento adequado de toda a estrutura utilizada para a secagem. Além disso, por meio da avaliação desses índices, é possível comparar a secagem entre espécies ou materiais diferentes e avaliar as peculiaridades dos produtos, como por exemplo finalidades e exigências distintas, como é o caso de grãos e sementes.

Dentre os diferentes índices utilizados para se avaliar a cinética de secagem dos produtos agrícolas, um dos mais importantes é o coeficiente de difusão. Este índice possibilita avaliar e comparar a velocidade de secagem de produtos com tamanhos, formas e texturas diferentes. Além disso, por meio da análise da dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, podem-se determinar alguns índices termodinâmicos que possibilitam avaliar energeticamente o processo de secagem.

Para o cálculo teórico do coeficiente de difusão, muitos pesquisadores têm se baseado na teoria da

difusão líquida, conhecida como segunda lei de Fick, que estabelece uma relação do coeficiente de difusão com o gradiente de concentração de um meio (Costa et al., 2011; Ferreira et al., 2012; Reis et al., 2011; Sousa, et al. 2011).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas e a limitação de informações teóricas a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem dos grãos de sorgo, objetivou-se neste trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem, selecionando aquele que melhor represente o fenômeno. Além disso, determinaram-se o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas associadas à secagem de grãos de sorgo (*Sorghum bicolor*).

Material e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Energia e Pós-colheita pertencente ao Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais da Uni-

versidade Federal de Mato Grosso - UFMT, *Campus Sinop*, Sinop, MT.

Foram utilizados grãos de sorgo da cultivar BRS 308 oriundos de um plantio experimental da Embrapa Agrossilvipastoril e da cultivar NIDERA A 9721 proveniente de um plantio comercial, ambos localizados no município de Sinop, MT, cujas características fitotécnicas estão descritas na Tabela 1. Os grãos foram colhidos manualmente, com teor de água médio de 0,37 (decimal b.s.) para a cultivar BRS 308 e de 0,39 (decimal b.s.) para a cultivar NIDERA A 9721.

A determinação do teor de água do produto foi feita pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105°C por 24 h em três amostras de 30 g (Brasil, 2009).

A secagem do sorgo foi realizada em uma estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. Desta forma, o experimento foi conduzido em um esquema fatorial 2×3, sendo duas cultivares (BRS 308 e NIDERA A 9721) e três temperaturas de secagem, disposto num delineamento inteiramente casualizado.

TABELA 1. Algumas características agrônômicas das cultivares NIDERA A 9721 e BRS 308¹.

Características	Cultivares	
	NIDERA 9721	BRS 308
Finalidade de uso	Grãos e silagem	Grãos
Ciclo	110-125 dias	120 dias
Cor do grão	Vermelho	Vermelho
Tanino	Ausente	Ausente
Tipo de panícula	Semi-aberta	Semi-aberta
Regiões indicadas	Sul	Sudeste e Centro-Oeste
Densidade de semeadura	200-220 mil plantas ha ⁻¹	160 mil plantas ha ⁻¹

¹Tabela elaborada a partir de informações das empresas produtoras dessas cultivares.

Para cada temperatura, foram utilizadas duas amostras com massa de 700 g, acondicionadas em bandejas com dimensões médias de $320 \times 260 \times 50$ mm. O acompanhamento da secagem do produto foi realizado por diferença de massa, conhecendo o teor de água inicial. Após o início da secagem, amostras foram retiradas e pesadas periodicamente, até o produto

atingir o teor de água desejado. Aos dados observados da secagem dos grãos de sorgo, foram ajustados modelos matemáticos que são frequentemente utilizados na literatura para descrever a secagem de diferentes produtos agrícolas (Andrade et al., 2006; Martinazzo et al., 2007; Goneli et al., 2009; Resende et al., 2009 e Corrêa et al., 2010), descritos na Tabela 2.

TABELA 2. Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas.

Descrição do Modelo ¹	Modelo	
Aproximação da Difusão	$RU = d \exp(-kt) + (1-d) \exp(-kft)$	(1)
Dois termos	$RU = d \exp(-kt) + f \exp(-gt)$	(2)
Exponencial de Dois Termos	$RU = d \exp(-kt) + (1-d) \exp(-kft)$	(3)
Henderson e Pabis	$RU = d \exp(-kt)$	(4)
Logaritmo	$RU = d \exp(-kt) + f$	(5)
Midilli	$RU = d \exp(-kt^n) + ft$	(6)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$	(7)
Thompson	$RU = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4bt^{0.5})}{2b}\right)$	(8)
Verma	$RU = d \exp(-kt) + (1-d) \exp(-gt)$	(9)

¹RU: razão de umidade, adimensional; t: tempo de secagem, min; k: constante de secagem, min⁻¹; e d, f, g e n: coeficientes de ajuste dos modelos.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_o - U_e} \quad (10)$$

A razão de umidade do produto durante a secagem, para as diferentes temperaturas do ar, foi determinada por meio da Equação 10.

em que:

U_t : teor de água do produto num dado instante de tempo, (b.s.);

U_e : teor de água do produto em equilíbrio, (b.s.); e

U_o : teor inicial de água do produto, (b.s.).

Os coeficientes dos modelos foram determinados por meio de análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. Para verificar o grau de ajuste, avaliou-se o erro cometido por cada modelo por meio das magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P), calculados pelas Equações 11 e 12, respectivamente. Além destes, também foram considerados a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e o comportamento da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso).

ções 11 e 12, respectivamente. Além destes, também foram considerados a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e o comportamento da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso).

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (11) \quad P = \frac{100}{\eta} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (12)$$

em que:

\hat{Y} : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

η : número de dados observados; e

GLR: graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida (Equação 13) aos dados experimentais da secagem de sorgo. Essa equação é a solução analítica da segunda lei de Fick, desconsiderando-se a contração volumétrica do produto, considerando a forma geométrica esférica e a condição de contorno do teor de água conhecido na superfície do produto (Brooker et al., 1992).

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{r_e^2}\right] \quad (13)$$

em que:

- r_e : raio equivalente do produto, m;
 D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$;
 n : número de termos da série;
 t : tempo, s.

O raio equivalente foi obtido por meio da avaliação das dimensões características principais de uma amostra de 50 grãos, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Conhecendo as dimensões características dos grãos de sorgo, o raio equivalente foi então calculado por meio da Equação 14.

$$r_e = \sqrt[3]{(abc)} \quad (14)$$

Em que:

- a : maior dimensão característica do produto, m;
 b : dimensão característica intermediária do produto, m; e
 c : menor dimensão característica do produto, m;

A dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura foi verificada por meio da equação de Arrhenius (Equação 15). Pela sua estrutura, pode-se observar que a relação de $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura (T_a^{-1}) fornece uma

reta cujo coeficiente angular permite estimar o valor da energia de ativação.

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right) \quad (15)$$

em que:

- D_0 : fator pré exponencial, $m^2 s^{-1}$;
 E_a : energia de ativação, $J mol^{-1}$;
 R : constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$; e
 T_a : temperatura de secagem, K.

A obtenção do valor da energia de ativação possibilitou determinar diferentes parâmetros termodinâmicos para a secagem dos grãos de sorgo, como a entalpia, entropia e a energia livre de Gibbs de ativação, de acordo com as Equações 16, 17 e 18 (Jideani & Mpotokwana, 2009).

$$\Delta H^* = \Delta E_a - RT_a \quad (16)$$

$$\Delta S^* = R \left[\ln k - \ln\left(\frac{k_b}{h_p}\right) - \ln T_a \right] \quad (17)$$

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T_a \Delta S^* \quad (18)$$

em que:

- ΔH^* : entalpia de ativação, $J mol^{-1}$;
 ΔS^* : entropia de ativação, $J mol^{-1}$;
 ΔG^* : energia livre de Gibbs de ativação, $J mol^{-1}$;
 k_b : constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J K^{-1}$; e
 h_p : constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} J s$.

Resultados e Discussão

Na Tabela 3, estão apresentados os índices estatísticos utilizados para avaliar os ajustes dos modelos matemáticos utilizados para descrever a secagem dos grãos de sorgo das cultivares BRS 308 e NIDERRA A 9721.

TABELA 3. Erro médio relativo (*P*), desvio padrão da estimativa (*SE*), coeficiente de determinação (*R*²) e tendência da distribuição de resíduos dos modelos utilizados para descrição das curvas de secagem dos grãos de sorgo.

		Cultivares							
		NIDERA A 9721				BRS 308			
T (°C)	Modelo	<i>SE</i> (%)	<i>P</i>	<i>R</i> ² (%)	Distribuição Residual*	<i>SE</i> (%)	<i>P</i>	<i>R</i> ² (%)	Distribuição Residual*
40	1	0,0794	14,941	90,88	T	0,0331	3,7533	98,77	T
	2	0,0462	8,5756	97,14	T	0,0107	1,6343	99,89	T
	3	0,0475	9,3944	96,48	T	0,0138	1,6983	99,76	T
	4	0,0531	9,8802	95,6	T	0,0205	1,8719	99,46	T
	5	0,0151	1,4646	99,67	A	0,0216	2,1629	99,47	T
	6	0,0112	1,3974	99,83	A	0,0126	1,9202	99,84	A
	7	0,0201	3,7277	99,37	T	0,0195	2,9775	99,52	T
	8	0,0171	2,8601	99,54	T	0,0248	3,5656	99,22	T
	9	0,0444	8,5756	97,14	T	0,0101	1,6343	99,89	T
50	1	0,0387	6,2075	98,05	T	0,0251	3,2661	99,47	T
	2	0,0122	1,3511	99,83	A	0,0231	4,2375	99,64	T
	3	0,0163	2,5351	99,61	T	0,0192	4,1348	99,63	T
	4	0,0279	4,4232	98,87	T	0,0209	3,9564	99,55	T
	5	0,0119	1,3532	99,81	A	0,0193	1,6074	99,68	T
	6	0,0122	1,2661	99,83	A	0,0161	2,1958	99,83	A
	7	0,0154	2,5592	99,66	T	0,0228	3,7088	99,47	T
	8	0,0141	2,0484	99,71	T	0,0229	3,2707	99,46	T
	9	0,0235	3,4996	99,29	T	0,0207	4,2375	99,64	T
60	1	0,0279	3,5776	99,04	T	0,0225	4,9289	99,64	T
	2	0,0137	1,8561	99,29	A	0,0363	6,9025	99,29	T
	3	0,0118	1,9023	99,8	A	0,0312	7,4801	99,13	T
	4	0,0189	2,6083	99,48	T	0,0299	7,3303	99,2	T
	5	0,015	1,8517	99,72	A	0,0118	2,2613	99,89	T
	6	0,0142	1,8469	99,79	A	0,0084	1,2052	99,97	A
	7	0,0122	1,7919	99,79	A	0,0222	5,3109	99,56	T
	8	0,0148	1,8834	99,69	A	0,0312	7,4809	99,13	T
	9	0,0112	1,5359	99,79	A	0,0315	6,9025	99,29	T

*Distribuição residual: "A" - Aleatória e "T" - Tendenciosa.

Nota-se que todos os modelos apresentaram baixas magnitudes dos valores do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P), sendo este sempre menor que 10%, valor este relatado como satisfatório em diversos trabalhos (Lomauro et al., 1985; Madamba, 1996; Samapundo et al., 2007). Porém, analisando os demais índices estatísticos, verificou-se que apenas o modelo de Midilli apresentou uma distri-

buição aleatória dos resíduos para todas as condições de secagem analisadas e para ambas as cultivares.

A Figura 1 apresenta exemplos de distribuição dos resíduos observados neste trabalho para a cultivar BRS 308, sendo uma distribuição aleatória (A) e uma tendenciosa (B), para os modelos de Midilli e Aproximação da difusão, respectivamente, no ajustamento aos dados da secagem na temperatura de 40 e 60°C.

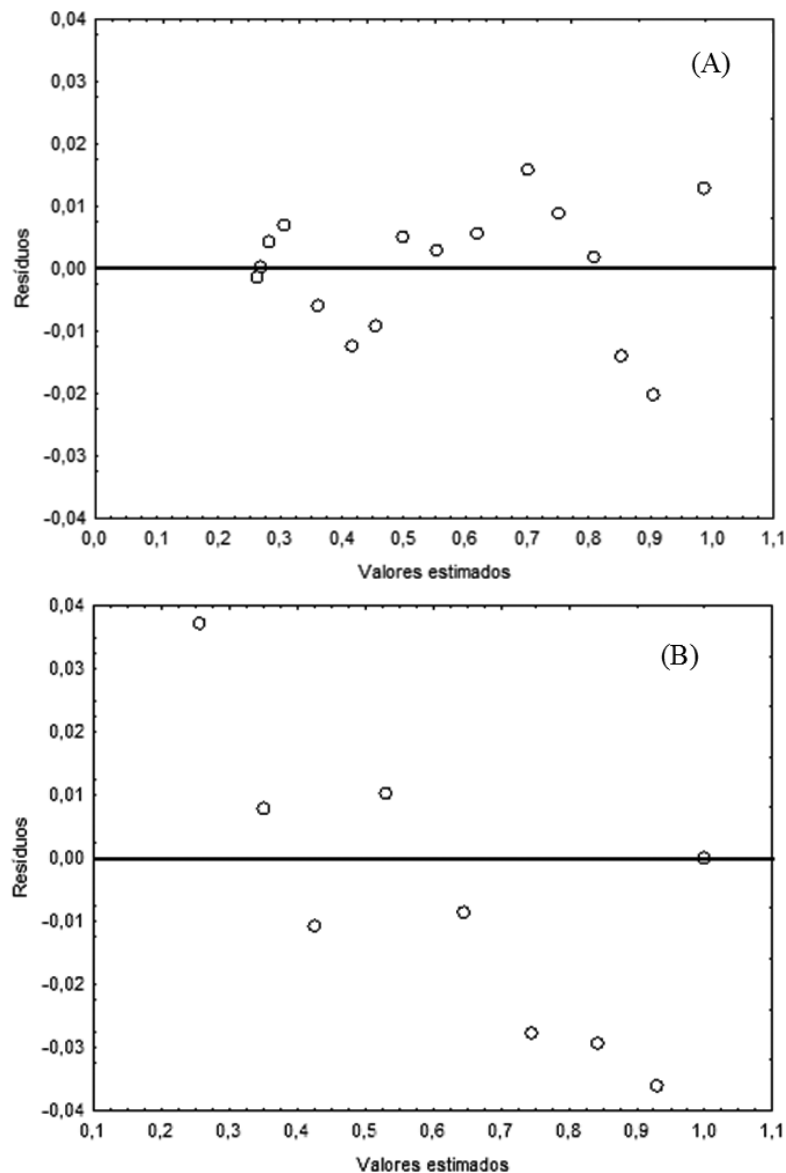


FIGURA 1. Exemplos de distribuição de resíduos aleatória (A) e tendenciosa (B) referentes à modelagem da cinética de secagem de grãos de sorgo para a cultivar BRS 308.

O modelo de Midilli apresentou ainda valores do coeficiente de determinação sempre acima de 99,8%. Apesar da utilização do coeficiente de determinação ser usado apenas como índice auxiliar e não como critério de avaliação de modelos não-lineares (Aviara et al., 2004; Kashaninejad et al., 2007; Cunningham et al., 2007), este índice normalmente apresenta maiores valores para aqueles modelos com me-

lhor ajuste, caso deste trabalho. Sendo assim, o modelo de Midilli foi o recomendado para a descrição das curvas de secagem dos grãos de sorgo.

Na Figura 2, estão apresentados os valores observados experimentalmente e os estimados pelo modelo de Midilli para a secagem dos grãos de sorgo das duas cultivares e para as diferentes temperaturas de secagem utilizadas.

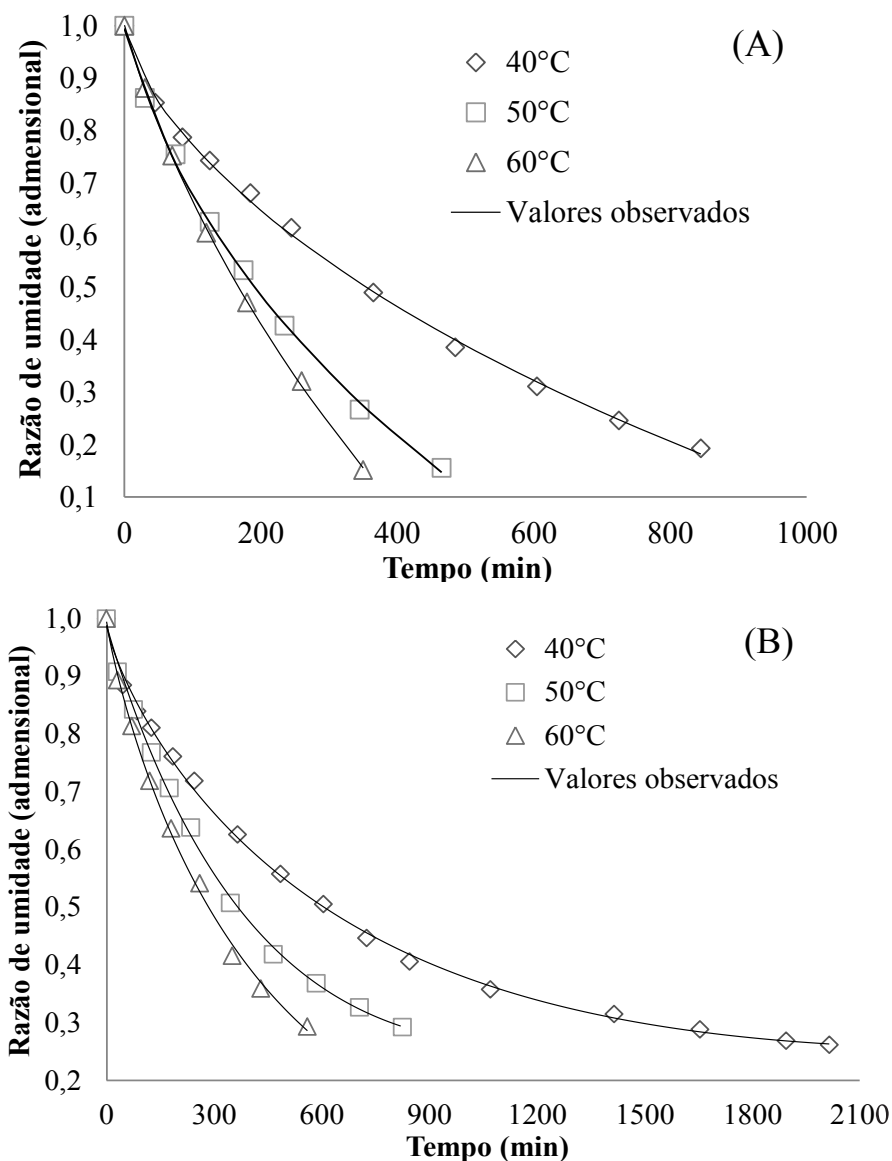


FIGURA 2. Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Midilli para a secagem de grãos de sorgo BRS 308 (A) e NIDERA A 9721 (B).

Nota-se que as curvas de secagem do sorgo apresentam uma tendência exponencial tipicamente observada em produtos agrícolas durante o período de secagem com taxa decrescente. Observa-se ainda uma correspondência satisfatória entre os dados estimados pelo modelo de Midilli e os observados experimentalmente, evidenciando que os índices estatísticos empregados foram condizentes para selecionar o modelo. Na Tabela 4, estão apresentados os coeficientes do modelo de Midilli para as duas cultivares de sorgo analisadas.

O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de sorgo aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, para ambas as cultivares (Tabela 5). A dependência desse coeficiente com a temperatura

de secagem é frequentemente observada na maioria dos estudos de secagem de grãos em que busca-se determinar esse coeficiente, conforme verificaram Costa et al. (2011) para sementes de cramebe, Sousa et al. (2011) para nabo forrageiro, Oliveira et al. (2012) para grãos de milho e Moraes et al. (2013) para grãos de feijão caupi.

Pode-se observar também que os valores do coeficiente de difusão foram sempre maiores para a cultivar BRS 308 em relação à NIDERA A 9721. Apesar do sorgo ser um tipo de grão predominantemente amiláceo, algumas variações físicas que ocorrem devido à característica varietal, como a relação superfície-volume e o tamanho médio dos grãos, podem interferir na velocidade de secagem.

TABELA 4. Coeficientes do modelo de Midilli obtidos para as cultivares BRS 308 e NIDERA A 9721 nas três temperaturas de secagem analisadas.

T (°C)	Cultivar							
	BRS 308				NIDERA A9721			
	d	k	n	f	d	k	n	f
40	0,9953	0,0090	0,698	-0,0002	0,9871	0,0039	0,8225	0,000068
50	0,9938	0,0084	0,7961	-0,0004	0,9888	0,0025	0,9761	0,000147
60	10,015	0,0057	0,8673	-0,0007	0,9948	0,0048	0,8793	-0,000002

TABELA 5. Valores observados dos coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}) das cultivares BRS 308 e NIDERA A 9721 de sorgo para as diferentes temperaturas de secagem utilizadas.

T (°C)	D_{ef} (m ² s ⁻¹)	
	BRS 308	NIDERA A 9721
40	$4,93 \times 10^{-12}$	$2,383 \times 10^{-12}$
50	$9,35 \times 10^{-12}$	$4,067 \times 10^{-12}$
60	$1,07 \times 10^{-11}$	$5,417 \times 10^{-12}$

A dependência do D_{ef} com a temperatura foi descrita pela relação de Arrhenius (Figura 3) e assim determinada a energia de ativação. Para a faixa de temperatura estudada (40 - 60°C), a variação do coeficiente de difusão efetivo devido à variação da temperatura do ar de secagem foi uniforme, havendo elevada correspondência entre os valores observados e os estimados pela relação de Arrhenius.

A energia de ativação, por definição, é a energia mínima exigida para que um determinado processo seja desencadeado; entre eles, o processo difusivo (Kashaninejad et al., 2007). A energia de ativação para a difusão de água nos grãos de sorgo durante o processo de secagem e para a faixa de temperatura estudada foi de 33,82 kJ mol⁻¹ para a cultivar BRS 308 e de 35,71 kJ mol⁻¹ para a cultivar NIDERA A 9721. Estes valores estão coerentes com os resultados relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas, que, de acordo com

Zogzas et al. (1996), pode variar de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹. Observa-se ainda que, mesmo com os valores do coeficiente de difusão efetivo sendo diferentes para as duas cultivares, os valores da energia de ativação foram semelhantes. Isto ocorreu porque as diferenças entre os valores do coeficiente de difusão efetivo foram praticamente constantes entre as duas cultivares, para uma mesma temperatura de secagem.

Analisando a Tabela 6, percebe-se que a energia livre de Gibbs e a entropia de ativação aumentaram (em módulo), enquanto que a entalpia de ativação diminuiu ligeiramente com a elevação da temperatura do ar de secagem, para a faixa estudada. Numa análise matemática das Equações 16, 17 e 18, utilizadas para determinar essas propriedades termodinâmicas, estes resultados eram esperados e são coerentes com aqueles relatados por Corrêa et al. (2010) para a secagem de frutos de café. Além disso, assim como os va-

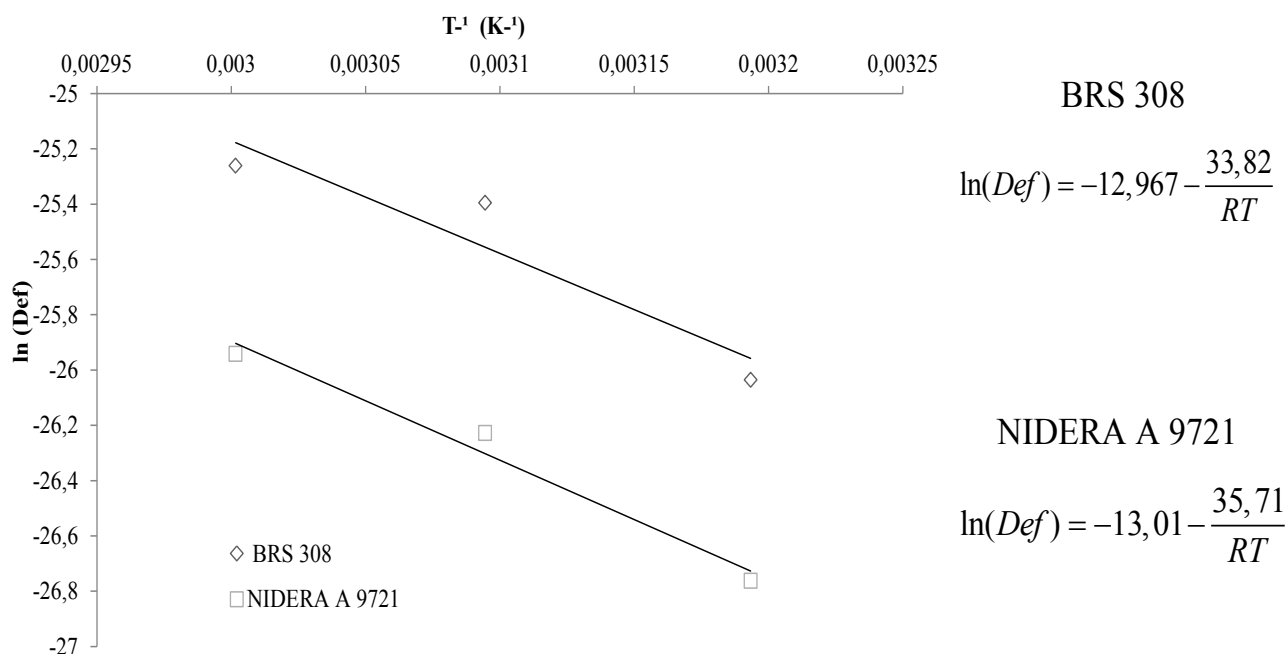


FIGURA 3. Relação de dependência do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) dos grãos de sorgo com a temperatura do ar de secagem, por meio da representação de Arrhenius.

TABELA 6. Valores da entalpia de ativação (ΔH^*), entropia de ativação (ΔS^*) e energia livre de Gibbs de ativação (ΔG^*) para a secagem das cultivares de sorgo BRS 308 e NIDERA A 9721 em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	BRS 308			NIDERA A 9721		
	ΔH^* (J mol ⁻¹)	ΔS^* (J mol ⁻¹)	ΔG^* (kJ mol ⁻¹)	ΔH^* (J mol ⁻¹)	ΔS^* (J mol ⁻¹)	ΔG^* (kJ mol ⁻¹)
40	31217,8	-224,01	101,367	33109,3	-223,98	103,250
50	31134,7	-224,27	103,608	33026,1	-224,25	105,491
60	31051,5	-224,53	105,852	32943,0	-224,50	107,734

lores da energia de ativação, estes encontrados para a energia livre de Gibbs, entalpia e entropia de ativação também foram semelhantes para ambas as cultivares, indicando que a energia requerida no processo de secagem foi similar.

Conclusões

O modelo de Midilli é o que apresenta o melhor ajuste aos dados de secagem dos grãos de sorgo, sendo o modelo recomendado para descrever as curvas de secagem das duas cultivares avaliadas (BRS 308 e NIDERA A 9721), nas condições em que foi realizado o experimento. Para ambas as cultivares, o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo que os valores obtidos variam de $4,93 \times 10^{-12}$ a $1,07 \times 10^{-11}$ m² s⁻¹ para a cultivar BRS 308 e de $2,38 \times 10^{-12}$ a $5,42 \times 10^{-12}$ m² s⁻¹ para a cultivar NIDERA A 9721.

A energia de ativação é de 33,82 kJ mol⁻¹ e 35,71 kJ mol⁻¹ para as cultivares BRS 308 e NIDERA A 9721, respectivamente. Os valores da entalpia de ativação diminuem, enquanto que a entropia e a energia livre de Gibbs aumentam com a elevação da temperatura de secagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C.; TEIXEIRA, L. P.; PEREIRA, R.G.; CALOMENI, J. F. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, Niteroi, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S.A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 87, n. 2, p. 179-190, 2004.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Londres, v. 60, p. 167-173, 1995.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**, Brasília, DF, 2009. 399 p.

- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinold,, 1992. 450 p.
- 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**, Viçosa, MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.
- 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, p. 1089-1096, 2011.
- CUNNINGHAM, S. E.; MCMINN, W. A. M.; RICHARDSON, P. S. Modelling water absorption of pasta during soaking. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 82, n. 4, p. 600-607, 2007.
- FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 6, p. 855-862, 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**, Viçosa, MG, n. 11, p.64-73, 2009.
- JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 92, n. 2, p. 182-188, 2009.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part 1. Fruit, vegetable and meat products. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 18, n. 2, p. 111-117, 1985.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic sices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊ, 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.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MONTE, J. E. C.; MARTINS, J. H.; LOPES, D. C.; MONTEIRO, P. M. B.; PINTO, P. R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringa, v. 30, n. 3, p. 307-312, 2008.
- MORAIS, S. J. M. **Cinética de secagem de grãos de feijão caupi**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Goiás, Goiás.
- OLIVEIRA, E. C. O.; 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**, Sete Lagoas, v. 11, n. 2, p. 190-201, 2012.
- REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 347–353, 2011.
- 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**, Maringa, v. 31, n. 2, p.189-196, 2009.
- SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 79, n. 1, p. 168-175, 2007.
- SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.
- 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.