

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA

HOSCHER, R. H.¹; BOTELHO, F. M.¹; HAUTH, M. R.¹; BOTELHO, S. C. C.²

¹Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, *Campus Sinop*, Sinop - MT, michele.r.hauth@hotmail.com; ²Embrapa Agrosilvipastoril.

A secagem dos produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade. O principal objetivo da secagem é reduzir a atividade de água no produto, diminuindo assim a atividade biológica e proporcionando que o mesmo seja armazenado de forma segura.

A simulação e as informações teóricas relacionadas com as variações fisiológicas, químicas e físicas observadas em cada produto, durante a remoção de água, são muito importantes para o estudo de sistemas de secagem, desenvolvimento e otimização de equipamentos, visando a sua viabilidade comercial.

Ressaltando-se a importância aprofundar estudos sobre secagem de produtos agrícolas, objetivou-se com este trabalho modelar e avaliar as curvas de secagem para soja [*Glycine max* (L.) Merrill], sob diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

Foram utilizados grãos de soja das variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR, produzidos do município de Sinop/MT, na safra 2014/2015. Inicialmente os grãos foram submetidos a um processo de limpeza, sendo separados os grãos avariados e as impurezas. O teor de água inicial das amostras foi de 0,28 e 0,30 (b.s.) para as variedades NS7901RR e TMG1180RR, respectivamente.

O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por 24 h em três amostras de aproximadamente 30 g.

As amostras foram submetidas à secagem numa estufa de circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, sendo as mesmas dispostas em bandejas de chapa galvanizada contendo, aproximadamente, 750 g de produto em duas repetições.

Posteriormente ao início da secagem, foi medido periodicamente a massa das amostras, utilizando uma balança analítica com resolução de 0,01 g. O teor de água durante a secagem foi determinado por diferença de massa conhecendo-se o teor de água inicial, até que se atingisse o teor de água final de pelo menos 0,15 (b.s.). Aos dados referentes à secagem dos grãos de soja, foram ajustados diferentes modelos matemáticos que são tradicionalmente utilizados para a descrição da cinética de secagem de produtos agrícolas (A Tabela 1).

A razão de umidade do produto durante a secagem, para as diferentes temperaturas do ar foi determinada por meio da Equação 7.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_o - U_e} \quad (7)$$

em que: U_t é o teor de água do produto num dado instante de tempo, % (b.s.); U_e é o teor de água do produto em equilíbrio, % (b.s.); e U_o é o teor inicial de água do produto, % (b.s.).

O teor de água de equilíbrio foi obtido a partir do modelo Oswin com seus coeficientes ajustados para o processo de dessorção, de acordo com a Equação 8 (AVIARA et al., 2004).

$$U_e = (19,024 + (-0,151T)) \left[\frac{UR}{1-UR} \right]^{1/3,72} \quad (8)$$

em que: T é a temperatura absoluta (K); e UR é a umidade relativa, (decimal).

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi feita análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. O grau de ajuste do modelo foi avaliado por meio das magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P), sendo que, de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices, melhor o ajuste do modelo aos dados observados. Foram considerados de ajuste satisfatório aqueles modelos que tiveram valores do erro médio relativo menores que 10% (MOHAPATRA & RAO, 2005). Os valores de P e SE para cada modelo foram calculados pelas Equações 9 e 10, respectivamente:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (9)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (10)$$

em que: Y é o valor observado experimentalmente; $\hat{Y}$ é o valor estimado pelo modelo; n é o número de dados observados; e GLR : graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

Além do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa, foram considerados ainda a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e a tendência da distribuição dos resíduos (aleatória ou tendenciosa).

Os índices estatísticos utilizados para seleção dos modelos matemáticos testados para descrever as curvas de secagem dos grãos de soja estão apresentados na Tabela 2.

Apesar de não ser um critério confiável para a seleção de modelos não lineares, observa-se que para todas as condições de secagem testadas, todos os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação (sempre maiores que 97,5%), sendo coerentes com as baixas magnitudes de erro apresentada. Todos os modelos apresentaram baixos valores do desvio-padrão da estimativa, um indicador positivo para os modelos, pois sua capacidade em descrever com fidelidade um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor deste índice. Todos os modelos apresentaram também valores do erro médio relativo (P) sempre menores que 10%, esse resultado indica um desvio percentual satisfatório dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo. Entretanto, dentre os modelos testados, o modelo de Midilli foi o único a apresentar tendência aleatória de distribuição dos resíduos para todas as condições de secagem testadas, sendo este critério conclusivo para que esse modelo seja o recomendado para descrever as curvas de secagem dos grãos de soja para as variedades NS7901RR e TMG1180RR. Os resíduos, que são a diferença entre valores observados experimentalmente pelos valores estimados pelos modelos, foram plotados de acordo com os valores estimados de teor de água de equilíbrio. É considerado um modelo aceitável aquele que apresentar os valores residuais próximos à faixa horizontal em torno de zero, não indicando tendenciosidade dos seus resultados. Caso apresente tendenciosidade o modelo é considerado inadequado para representar os dados. Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes ajustados do modelo Midilli para as diferentes temperaturas de secagem.

Conclui-se que o modelo de Midilli foi o que mais se ajustou aos dados experimentais e é o recomendado para representar a cinética de secagem em camada fina dos grãos de soja.

Referências

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S. A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v.87, p.179-190, 2004.
MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513-518, 2005.

Tabela 1. Modelos matemático utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas

Descrição do modelo	Modelo	
Aproximação da Difusão	$RU = d \exp(-kt) + (1-d) \exp(-kft)$	(1)
Dois Termos	$RU = d \exp(-kt) + f \exp(-gt)$	(2)
Logaritmo	$RU = d \exp(-kt) + f$	(3)
Midilli	$RU = d \exp(-kt^n) + ft$	(4)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$	(5)
Verma	$RU = d \exp(-kt) + (1-d) \exp(-gt)$	(6)

em que: RU é a razão de umidade, adimensional; t é o tempo de secagem, min; k é a constante de secagem, min^{-1} ; e d, f, g e n : coeficientes de ajustes dos modelos.

Tabela 2. Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), coeficiente de determinação (R^2), distribuição residual [DR, sendo tendenciosa (T) ou aleatória (A)] dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagens dos grãos de soja

Modelo		Variedades								
		NS7901RR				TMG1180RR				
		SE	P (%)	R ² (%)	DR	SE	P (%)	R ² (%)	DR	
Temperatura de secagem	40 °C	1	0,0132	2,16	99,89	T	0,0130	1,54	99,75	A
		2	0,0135	2,16	99,89	T	0,0133	1,57	99,75	A
		3	0,0216	3,03	99,69	T	0,0208	3,57	99,36	T
		4	0,0148	1,77	99,86	A	0,0147	1,66	99,70	A
		5	0,0156	1,98	99,83	A	0,0141	1,56	99,69	A
		6	0,0132	2,16	99,89	T	0,0245	3,79	99,11	T
	50 °C	1	0,0164	2,28	99,63	A	0,0415	7,079	98,54	T
		2	0,0146	1,99	99,73	A	0,0289	3,827	99,32	A
		3	0,0139	1,96	99,73	A	0,0284	3,874	99,32	A
		4	0,0142	2,39	99,75	A	0,0291	3,831	99,32	A
		5	0,0231	3,83	99,56	T	0,0296	4,259	99,23	A
		6	0,0289	5,30	98,84	T	0,0344	5,419	99,00	T
	60 °C	1	0,0266	4,18	99,29	T	0,0267	3,36	99,28	T
		2	0,0143	1,66	99,81	A	0,0172	2,04	99,72	A
		3	0,0142	1,67	99,80	A	0,0168	2,03	99,72	A
		4	0,0144	1,66	99,80	A	0,0172	2,04	99,72	A
		5	0,0155	2,16	99,75	T	0,0187	2,20	99,63	A
		6	0,0144	1,63	99,79	A	0,0166	2,02	99,72	A
	70 °C	1	0,0385	4,87	98,56	T	0,0553	7,87	97,54	T
		2	0,0094	1,12	99,92	A	0,0235	2,68	99,60	A
		3	0,0148	1,94	99,79	T	0,0276	3,97	99,39	A
		4	0,0098	1,16	99,92	A	0,0262	2,72	99,51	A
		5	0,0090	1,14	99,92	A	0,0246	2,72	99,47	A
		6	0,0089	1,12	99,92	A	0,0225	2,62	99,60	A

Tabela 3. Coeficientes ajustados do modelo de Midilli para secagem de grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG1180RR

T (°C)		Variedades							
		NS7901RR				TMG1180RR			
		a	k	n	b	a	k	n	b
40		0,9928	0,0098	0,7772	-0,0001	1,0046	0,0105	0,7870	0,00001
50		1,0018	0,0064	0,9455	0,0002	1,0126	0,0035	1,0444	0,0003
60		0,9929	0,0050	0,9913	0,0004	1,0007	0,0056	1,0210	0,0006
70		1,0039	0,0194	0,7937	0,0003	1,0006	0,0152	0,7876	0,0001