

Ajuste de modelos matemáticos a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja

Fitting of mathematical models for unit volumetric shrinkage and soybean weight

Thais Adriana de Souza Smaniotto¹, Osvaldo Resende¹, Daniel Emanuel Cabral de Oliveira^{2*}, Valdiney Cambuy Siqueira³, Kelly Aparecida Sousa¹

Resumo: O índice de contração volumétrica pode variar entre os produtos agrícolas. Normalmente, grãos como os de soja, que apresentam estruturas morfológicas simples e teor de água reduzido, apresentam baixos índices de contração no momento da secagem. No entanto, a sua quantificação e determinação podem contribuir para otimizar o processo de secagem. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar o ajuste de diferentes modelos matemáticos, identificando o que melhor representa o fenômeno da contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja submetidos à secagem em duas temperaturas. Foram utilizados grãos de soja (*Glycine Max L.*), cultivar M7211RR, com teor de água inicial de 0,31 (base seca, b.s.). Os grãos foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçada, nas temperaturas de 50 e 90 ± 1 °C até o teor de água de aproximadamente 0,13 (b.s.), determinando-se os teores de água do produto pelo método da estufa a 105 ± 1 °C. Acompanharam-se os teores de água por meio da perda de massa. Para cada teor de água pré-estabelecido, determinou-se o volume dos grãos por meio das medidas dos eixos ortogonais. Dentre os modelos analisados por meio do coeficiente de determinação, qui-quadrado, erro médio relativo e erro médio estimado, o modelo linear foi selecionado para descrição do fenômeno em questão devido a sua menor complexidade comparado aos demais. O modelo linear é capaz de descrever com eficácia a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja nas temperaturas de 50 e 90 °C.

Palavras-chave: *Glycine max* (L). Modelagem matemática. Teor de água.

Abstract: Rates of volumetric shrinkage can vary between agricultural products. Normally grains, such as the soybean, which have a simple morphological structure and low water content, have low rates of shrinkage when drying. However, quantification and determination can help to optimise the drying process. The aim of this study therefore, was to evaluate the fit of different mathematical models, identifying the one that best represents the phenomenon of unit volumetric shrinkage and weight in soybeans dried at two different temperatures. Soybeans (*Glycine max L.*) cultivar M7211RR were used, having an initial water content of 0.31 (dry basis, db). The grains were dried in a forced air circulation oven at temperatures of 50 and 90 ± 1 °C to a water content of approximately 0.13 (db), so as to determine the water content of the product by the oven method, at 105 ± 1 °C. Water content was tracked by means of weight loss. For each pre-established water level, the volume of the grains was determined by measuring the orthogonal axes. Among the models analysed using the coefficient of determination, chi-square, relative mean error and estimated mean error, the linear model was selected to describe the phenomenon in question due to its lower complexity compared to the rest. The linear model is able to effectively describe unit volumetric shrinkage and weight in soybeans at temperatures of 50 and 90 °C.

Key words: *Glycine max* (L). Mathematical modelling. Water content.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 28/03/2015 e aprovado em 18/10/2015

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde, Av. Sul Goiânia, Km 1, Zona Rural, CEP 75901-970, Rio Verde, Goiás, Brasil, tatiadris@ig.com.br; osvresende@yahoo.com.br; kellyapsousa@yahoo.com.br

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Iporá, Av. Oeste, nº 350, Parque União, CEP 76.200-000, Iporá, Goiás, Brasil, oliveira.d.e.c@gmail.com

³Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, Rodovia Dourados-Itahum, km 12. Campus Universitário Caixa-Postal: 533, CEP 79804-970, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil, vcambuy@yahoo.com

INTRODUÇÃO

A soja *Glycine max* (L.) Merrill é considerada uma das principais fontes de proteína e óleo vegetal do mundo, sendo amplamente utilizada para a elaboração de rações animais, produção de óleo e outros subprodutos (ARAÚJO, 2009).

Dentre os processos pós-colheita utilizados para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas, a secagem é um dos mais utilizados como forma de reduzir a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE *et al.*, 2008).

Uma das mais importantes mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume externo. Essa mudança é dependente do processo de secagem e do produto a ser secado, considerando que cada produto apresenta características físicas e químicas únicas. Assim, informações a respeito dessa singularidade são importantes para auxiliar no processamento pós-colheita, além de fornecer dados aos engenheiros e projetistas para elaboração de máquinas, estruturas, processos de controle, proporcionando melhor eficiência de um equipamento ou operação (ARAÚJO *et al.*, 2014).

O índice de contração volumétrica determina a relação entre o volume dos grãos para cada teor de água e o volume inicial, sendo de fundamental importância durante o processo de secagem em secadores, pois permite prever o comportamento de redução do volume ocupado pela massa de grãos, conforme ocorre a redução do teor de água (SIQUEIRA *et al.*, 2012a).

A contração volumétrica pode afetar os parâmetros da transferência de calor e massa, devendo ser considerada no estabelecimento de modelos de secagem (CORRÊA *et al.*, 2006). Segundo Ramos *et al.* (2005), para a completa descrição, precisão e análise do fenômeno de secagem, as modificações no produto referentes à sua contração volumétrica também devem ser incluídas nos modelos.

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). Segundo Goneli *et al.* (2011), informações a respeito do tamanho, volume, porosidade e massa específica dos produtos agrícolas são consideradas de grande importância para estudos que envolvem transferência de calor e massa, além de movimentação de ar em massas granulares.

Na literatura, existem várias equações teóricas, semi-teóricas e empíricas para descrever o fenômeno de secagem em camadas finas. Esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos; consideram, também, que todo o processo de secagem ocorra somente no período de taxa decrescente (RESENDE *et al.*, 2009).

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos, utilizando-se aproximações e modelos empíricos na tentativa de se melhor representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (GONELI *et al.*, 2011; SIQUEIRA *et al.*, 2011; RIBEIRO *et al.*, 2005).

Diante da importância do índice de contração volumétrica para a etapa pós-colheita, objetivou-se com o presente trabalho identificar o melhor modelo matemático que represente o fenômeno da contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja submetidos à secagem em duas temperaturas.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Pós-colheita de Produtos Vegetais, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IF Goiano – Câmpus Rio Verde), Rio Verde, Goiás, com as seguintes coordenadas geográficas: 17°48'19"; 50°54'18".

Foram utilizados grãos de soja da cultivar M7211RR, com teor de água inicial de 0,31 (base seca, b.s.). Os grãos foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçada nas temperaturas de 50 e 90 ± 1 °C até atingirem o teor de água de 0,13 (b.s.). Essas temperaturas foram selecionadas por serem comumente empregadas para a secagem de sementes e grãos de soja.

O teor de água inicial do produto foi determinado pelo método da estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 h, em três repetições, conforme (BRASIL, 2009). A partir do conhecimento do teor de água inicial, foram pré-estabelecidos os teores de água de leitura do índice de contração volumétrica dos grãos de soja.

Para a determinação do momento de cada leitura durante o processo de secagem, a massa equivalente ao teor de água em que a secagem foi interrompida foi calculada aplicando-se as equações 1 e 2, descritas a seguir:

$$PQ = \left[\frac{(X_i - X_f)}{(100 - X_f)} \right] \times 100 \quad (E1)$$

$$M_f = M_i - \left[M_i \times \left(\frac{PQ}{100} \right) \right] \quad (E2)$$

Onde: M_f: massa final (kg); M_i: massa inicial (kg); PQ: Porcentagem de quebra (%); X_i: teor de água inicial (%; bu); X_f: teor de água final (%; bu).

Para cada teor de água encontrado, foram determinadas as propriedades físicas dos grãos, por meio das medidas dos eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura) de 15 grãos, com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Cada grão foi considerado uma repetição, e foram utilizados materiais distintos para cada temperatura de secagem.

O volume de cada grão (V) em mm³ foi obtido ao longo do processo de secagem de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot c}{6} \quad (E3)$$

em que:

a: comprimento, mm;

b: largura, mm;

c: espessura, mm.

O índice de contração volumétrica unitária foi determinado pela relação entre volume encontrado em cada teor de água e o volume inicial (GONELI *et al.*, 2011).

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (E4)$$

em que:

ψ : índice de contração volumétrica, decimal;

V: volume em cada teor de água, mm³; e

V₀: volume inicial, mm³.

O volume da massa de grãos foi obtido por meio de um recipiente graduado com capacidade para 0,25 dm³, em três repetições. A determinação do volume foi efetuada em teores de água pré-estabelecidos. Sendo o acompanhamento da redução do teor de água realizado por meio de pesagem em balança de precisão de 0,001 g.

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária e da massa foram ajustados os modelos descritos pelas expressões listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas

Table 1 - Models used to simulate the index of volumetric shrinkage in agricultural products

Referência	Modelo	
Exponencial	$\psi = a_1 \cdot \exp(b \cdot x)$	(5)
Bala & Woods (1984) mod.	$\psi = 1 - a_1 [1 - \exp[-a_2(X_i - X)]]$	(6)
Linear	$\psi = a_1 + a_2 \cdot X$	(7)
Polinomial	$\psi = a_1 + a_2 \cdot X + a_3 \cdot X^2$	(8)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = 1 / (a_1 + b \cdot \exp(X))$	(9)

em que:

ψ : índice de contração volumétrica;

X: teor de água do produto, (kg de água/kg de matéria seca);

X_i: teor de água inicial do produto, (kg de água/kg de matéria seca);

a₁, a₂, a₃: coeficientes do modelo.

Para o ajuste dos modelos matemáticos foi realizada a análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o programa Statistica 7.0. Para verificar o grau de ajuste de cada modelo, foi considerada a significância

do coeficiente de regressão pelo teste t, a magnitude do coeficiente de determinação (R²), os valores do erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e do teste de qui-quadrado (χ^2).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (E10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (E11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (E12)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

GLR: Graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Depois da seleção do modelo para a representação do processo de contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja, promoveu-se o teste da hipótese de igualdade dos modelos utilizando a técnica de identidade de modelos descrita por Regazzi (2003). Essa técnica permite analisar a equivalência entre os modelos utilizados, objetivando o ajuste de uma única equação para descrição do fenômeno estudado.

Os parâmetros do modelo linear, para a contração volumétrica nas temperaturas de 50 (a₁ e b₁) e 90 (a₂ e b₂), foram comparados entre si para verificar a sua igualdade. Formularam-se as seguintes hipóteses:

H₀⁽¹⁾: a₁ = a₂ = a versus H_a⁽¹⁾: nem todos a são iguais.

H₀⁽²⁾: b₁ = b₂ = n versus H_a⁽²⁾: nem todos a são iguais.

H₀⁽³⁾: a₁ = a₂ = a e b₁ = b₂ = b versus H_a⁽³⁾: existe pelo menos uma desigualdade.

Segundo Regazzi (2003), para obtenção das formas do modelo completo das equações com restrição, foram consideradas as variáveis dummy (D): sendo D_i = 1 se a observação y_{ij} pertence ao grupo i; e D_i = 0 em caso contrário.

A regra de decisão baseou-se no teste de qui-quadrado (X²), de acordo com a seguinte expressão:

$$X^2 \text{ calculado} = -N \ln \left(\frac{SQR_{\Omega}}{SQR_{\omega_i}} \right) \quad (E13)$$

em que,

N: número de observções;

SQR_Ω: soma dos quadrados residuais do modelo completo;

SQR_{ω_i}: soma dos quadrados residuais do espaço paramétrico restrito

O valor tabelado de (χ^2) é função do nível de significância α e do número de graus de liberdade:

$$V = p\Omega - p_{wi} \quad (E14)$$

em que,

v : graus de liberdade do modelo;

$P\Omega$: número de parâmetros do modelo completo;

P_{wi} : número de parâmetros do modelo com restrição.

Foram testadas as duas condições de ar que apresentavam as temperaturas de 50 e 90 °C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apenas o modelo linear (5) e polinomial (6) apresentam valores de R^2 superiores a 95% na condição de 50 °C (Tabela 2), que, segundo Madamba *et al.* (1996), indica uma representação satisfatória do fenômeno. Na condição de 90 °C, os modelos apresentaram valores de R^2 inferiores a 95%, sendo o maior valor correspondente ao modelo polinomial (6). Logo, a avaliação dos outros parâmetros foi essencial para a escolha do modelo.

Os modelos analisados obtiveram valores do erro médio relativo inferiores a 10%, para as duas condições

de secagem, no qual os modelos linear e polinomial se destacaram pelo menor valor. Mohapatra e Rao (2005) ressaltam que os modelos que apresentam erro médio relativo (P) inferior a 10% indicam descrição adequada do fenômeno estudado.

Os cinco modelos testados apresentaram valores significativos de qui-quadrado. Segundo Günhan *et al.* (2005), quanto menor o valor do qui-quadrado, melhor o ajuste do modelo. Logo, os modelos linear (7) e polinomial (8) são os que melhor atendem esse parâmetro, confirmando os testes anteriores. Esses modelos, também, foram os que apresentaram os menores valores de erro médio estimado, indicando bom ajuste. Draper e Smith (1998) afirmam que a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado.

De acordo com a análise dos parâmetros estatísticos, verifica-se que os modelos linear e polinomial são os que melhor representam a contração volumétrica unitária dos grãos de soja. Entretanto, o modelo linear foi selecionado para a descrição matemática do fenômeno em questão devido a sua menor complexidade.

Verifica-se que, à exceção do modelo proposto por Corrêa *et al.* (2004) (9), os demais modelos proporcionaram

Tabela 2 - Coeficientes de determinação (R^2 , %), erro médio estimado (SE, decimal) e relativo (P, %) e valores de qui-quadrado calculado (χ^2 , decimal $\times 10^{-3}$) para os modelos ajustados a contração unitária dos grãos de soja durante a secagem

Table 2 - Coefficients of determination (R^2 , %), estimated mean error (SE, decimal) and relative mean error (P, %), and calculated chi-square values (χ^2 , decimal $\times 10^{-3}$) for models adjusted for unit volumetric shrinkage in soybeans during drying

Modelos	SE	P	R^2		χ^2
			50 °C	90 °C	
Exponencial	0,0062	0,4886	94,90	94,90	0,0385
Bala & Woods (1984) mod.	0,0065	0,4788	94,39	94,39	0,0423
Linear	0,0061	0,3807	95,01	95,01	0,0377
Polinomial	0,0060	0,4214	95,27	95,27	0,0358
Corrêa <i>et al.</i> (2004)	0,0196	1,4272	49,12	49,12	0,3844
90 °C					
Exponencial	0,0147	1,1725	87,85	87,85	0,215
Bala & Woods (1984) mod.	0,0146	1,1073	88,01	88,01	0,212
Linear	0,0144	0,9556	88,26	88,26	0,207
Polinomial	0,0133	0,8734	90,02	90,02	0,176
Corrêa <i>et al.</i> (2004)	0,0340	2,6333	34,55	34,55	1,156

valores de R^2 superiores a 98% e 93% nas condições de 50 e 90 °C, respectivamente (Tabela 3). Todos os modelos analisados apresentaram baixas magnitudes para erro médio estimado, valores significativos de qui-quadrado e erro médio relativo inferior a 10% para as duas condições de secagem, atendendo, portanto, todos os requisitos para sua recomendação na descrição da contração volumétrica da massa dos grãos de soja. O modelo de Corrêa *et al.* (2004) foi descartado devido ao baixo valor de R^2 .

Diante da simplicidade, facilidade de aplicação, interpretação dos seus parâmetros e do bom ajuste aos valores experimentais da contração volumétrica da soja nas duas condições de secagem o modelo linear foi utilizado para descrever o fenômeno.

Verifica-se que o valor de qui-quadrado calculado ($\chi^2_{\text{calculado}}$) da contração volumétrica da massa foi menor que o valor de qui-quadrado tabelado (χ^2_{tabelado}) (Tabela 4). Assim, confirma-se a hipótese formulada (H_0), ou seja, os modelos lineares analisados para determinação da contração volumétrica da massa dos grãos de soja secados nas temperaturas de 50 e 90 °C não diferem estatisticamente

entre si, podendo ser utilizado um único modelo linear para as duas temperaturas estudadas.

A contração volumétrica da massa dos grãos de soja nas diferentes temperaturas pode ser descrita pela Equação 15, de acordo com o teste de qui-quadrado, ao nível de 5% de significância.

$$\psi = 0,7185^{**} + 0,0089^{**} \cdot X \quad (E15)$$

Na contração unitária, o valor de qui-quadrado calculado ($\chi^2_{\text{calculado}}$) foi maior que o valor qui-quadrado tabelado (χ^2_{tabelado}). Assim, rejeita-se a hipótese formulada (H_0), ou seja, a contração volumétrica unitária dos grãos de soja ocorre diferentemente para cada temperatura utilizada.

Os valores médios experimentais e estimados pelo modelo linear (Equação 15) para a contração volumétrica da massa dos grãos de soja, durante a secagem nas temperaturas de 50 e 90 °C, estão inseridos na Figura 1.

A Figura 2 demonstra os valores médios experimentais da contração unitária dos grãos de soja, ajustados pelo modelo Linear, em função do teor de água.

Tabela 3 - Modelos de contração volumétrica da massa de grãos de soja, coeficientes de determinação (R^2 , %), erro médio estimado (SE, decimal) e relativo (P, %) e valores de qui-quadrado calculado (χ^2 , decimal x 10^{-3}) nas diversas condições de temperatura

Table 3 - Volumetric shrinkage models for soybean weight, coefficients of determination (R^2 , %), estimated mean error (SE, decimal), relative mean error (P, %) and calculated chi-square values (χ^2 , decimal x 10^{-3}) under various temperature conditions

Modelos	SE	P	R^2		χ^2
			50 °C	90 °C	
5	0,00703	0,58636	98,73	93,69	0,049
6	0,00669	0,51072	98,84	94,50	0,045
7	0,00770	0,49552	98,47	93,14	0,059
8	0,00655	0,47553	98,89	94,79	0,043
9	0,04334	3,57071	51,51	47,99	1,878
90 °C					
5	0,01568	1,08698	93,69	93,69	0,246
6	0,01464	1,04266	94,50	94,50	0,214
7	0,01635	0,79872	93,14	93,14	0,267
8	0,01424	0,93146	94,79	94,79	0,203
9	0,04503	3,77347	47,99	47,99	2,027

Tabela 4 - Teste das hipóteses (H_0) utilizando o teste de Qui-quadrado

Table 4 - Test of hypotheses (H_0) using the chi-square test

Modelo	GL	χ^2_{tabelado}	$\chi^2_{\text{calculado}}$
Contração da massa	2	5,991	0,8209
Contração unitária	2	5,991	6,6371

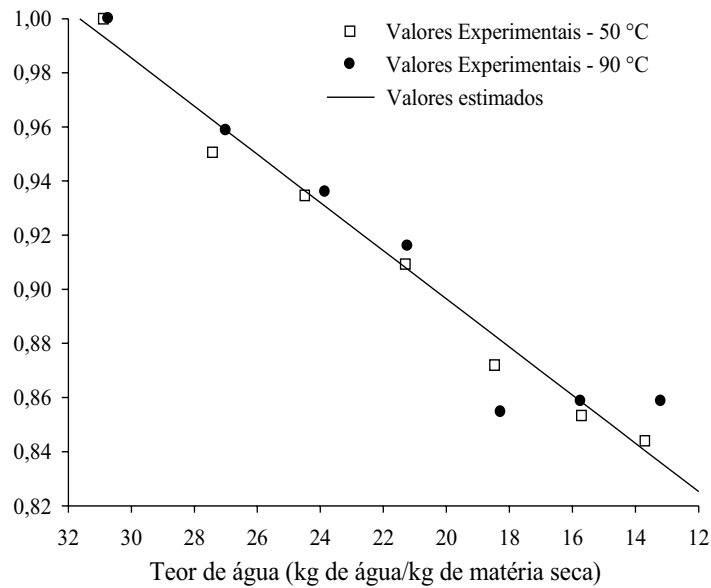


Figura 1 - Valores experimentais e estimados pelo modelo Linear para a contração volumétrica da massa (ψ_m) dos grãos de soja submetidos a duas condições de secagem.

Figure 1 - Experimental values and estimated by linear model for the volumetric shrinkage of mass (ψ_m) of soybeans subjected to two drying conditions.

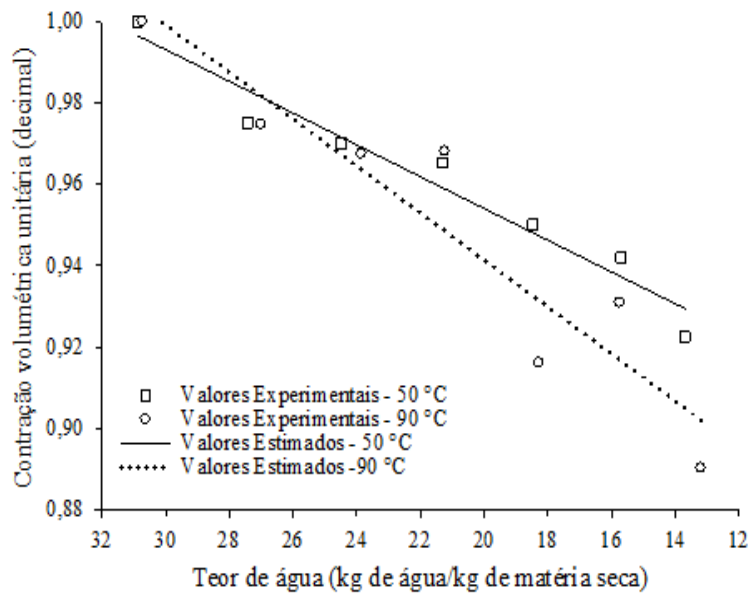


Figura 2 - Valores da contração volumétrica unitária (ψ_g) dos grãos de soja, experimentais e estimados pelo modelo Linear para as temperaturas de 50 e 90 °C.

Figure 2 - Experimental values, and values estimated by linear model for unit volumetric shrinkage (ψ_g), in soybeans at temperatures of 50 and 90 °C.

Tabela 5 - Coeficientes do modelo de Linear ajustados para a contração unitária e da massa dos grãos de soja nas diferentes condições de secagem

Table 5 - *Linear-model coefficients adjusted for unitary shrinkage and by weight in soybeans under different drying conditions*

Coeficientes	Contração unitária	
	50 (°C)	90 (°C)
a	0,875953**	0,825825**
b	0,003905**	0,005777**

** significativo a 1% de significância, pelo teste F.

** Significant at 1 % significance level, the F test.

Verificou-se bom ajuste do modelo selecionado aos valores experimentais, além disso a temperatura de 90 °C proporcionou maior contração nos grãos de soja, provavelmente decorrente da maior taxa de redução de água nessa condição de secagem. Segundo Siqueira *et al.* (2012b), com o aumento da temperatura do ar, registra-se uma maior diferença entre a pressão parcial de vapor d'água do ar de secagem e do produto, fazendo com que a água seja removida com mais facilidade e rapidez.

Observou-se que na secagem de 90 °C houve um trincamento dos grãos durante a redução do teor de água, esse fenômeno foi mais evidente nos menores teores de água do produto. Isso ocorre devido à alta temperatura de secagem, que promove alta taxa de remoção de água do grão.

Os coeficientes do modelo linear ajustados aos valores experimentais da contração volumétrica unitária dos grãos de soja, submetidos à secagem em diferentes temperaturas, estão apresentados na Tabela 5.

Nota-se que os coeficientes foram altamente significativos para as duas condições de secagem, reforçando a adequabilidade do modelo linear simples aos dados experimentais de contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja.

CONCLUSÃO

O modelo linear simples é capaz de descrever com eficácia a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja nas temperaturas de 50 e 90 °C.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

ARAÚJO, M. M. **Caracterização e seleção de linhagens de soja resistentes ou tolerantes à ferrugem asiática**. Piracicaba. 2009. 77 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Piracicaba, 2009.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; SOUZA, C. M. A.; GONÇALVES, A. A.; VILHASANTIS, H. C. B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v18, n. 3, p. 279–286, 2014.

BALA, B. K.; WOODS, J. L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 30, n. 3, p. 235-244, 1984.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 395 p.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 2, p. 117-126, 2006.

CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; GONELI, A. L. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14., 2004, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: IDS, 2004. v. A, p.742-747.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley, 1998. 712 p.

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

- GÜNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 11/12, p. 1667-1679, 2005.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841 p.
- 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**, v. 13, n. 4, p. 300-313, 2005.
- RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 1, p. 195-203, 2005.
- REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, v. 50, n. 287, p. 9-26, 2003.
- RESENDE, O.; CORREA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, 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**, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.
- RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RODRIGUES, D. H.; GONELI, A. L. D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 3, p. 611-617, 2005.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Contração volumétrica dos frutos de pinhão-manso durante a secagem em diversas temperaturas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 36, n. 2, p. 171-178, 2011.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012a.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Revista Ceres**, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012b.