

Modelagem da contração volumétrica do feijão-adzuki durante a secagem

Modeling the shrinkage of adzuki bean grain during drying

Daniel Emanuel Cabral de OLIVEIRA¹; Osvaldo RESENDE²; Udenys Cabral MENDES³;
Thaís Adriana de Souza SMANIOTTO⁴; Juliana Rodrigues DONADON⁵

¹ Autor para correspondência, Doutorando em Ciências Agrárias-Agronomia, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde – GO, Brasil, Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais. Rod. Sul Goiana, km 01- Cx. Postal: 66- CEP 75.901-970, Fones: (64) 3620-5641. Fax: (64) 3620-5640. oliveira.d.e.c@gmail.com

² Dr, Engenheiro Agrícola, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde – GO, Brasil, osvresende@yahoo.com.br

³ Doutorando em Agronomia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil, udenys-ago@hotmail.com

⁴ Doutoranda em Ciências Agrárias-Agronomia, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde – GO, Brasil, tatiadris@ig.com.br

⁵ Dr^a em Agronomia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Campo Grande – MS, DTA/CCBS, Brasil, julianadonadon@yahoo.com.br

Recebido em: 05-09-2012; Aceito em: 04-11-2013

Resumo

O feijão é um alimento rico em proteína de enorme importância na alimentação humana, sendo a principal fonte de proteínas das populações de baixa renda. O feijão-adzuki (*Vigna angularis*) é originário da China e vem ganhando espaço no Brasil, sendo produzido principalmente em colônias japonesas. Objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais da contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki submetidos à secagem, em três condições de ar. Os grãos com teor de água inicial de 92,08% (% b.s.) foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada, nas temperaturas de 40; 60 e 80 °C, até atingirem o teor de água de, aproximadamente, 14,80 (% b.s.). Aos dados experimentais, foram ajustados modelos matemáticos utilizados para a representação da contração volumétrica dos produtos agrícolas. Os modelos foram avaliados por meio do coeficiente de determinação, dos erros médio relativo e estimado, e do teste de qui-quadrado. Conclui-se que o teor de água e a temperatura de secagem influenciam na contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki, sendo este fenômeno satisfatoriamente descrito pelo modelo de Bala & Woods modificado. A contração volumétrica unitária dos grãos pode ser representada por um único modelo, para as temperaturas de secagem de 60 e 80 °C.

Palavras-chave adicionais: Bala & Woods modificado; identidade de modelos; modelos matemáticos; teor de água.

Abstract

Beans are a protein rich food of enormous importance in human nutrition and are the most important source of proteins for low income populations. Adzuki bean (*Vigna unguate*) is originated from China and is increasingly important in Brazil where is cultivated mainly by the Japanese colony. The objective of this study was to adjust different mathematical models to experimental values of the unitary volumetric contraction of the adzuki grain submitted to drying under three different air conditions. The grains at an initial moisture content of 92.08% (dry basis %) were exposed to drying in an forced ventilation oven at temperatures of 40, 60, and 80 °C until they reached a moisture content of 14.8%, dry basis. To the experimental data mathematical models were adjusted in order to have the representation of the volumetric shrinkage of the agricultural products. The models were evaluated by means of the determination coefficient, of the mean relative and estimated errors of the chi-square test. The results showed that the grain moisture content and the drying temperature had a significant influence on the unitary volumetric shrinkage of the grain and that this phenomenon is satisfactorily described by the modified Bala & Woods model. The unitary volumetric shrinkage of the grains may be represented by a sole model for drying temperatures between 60 and 80 °C.

Additional keywords: Bala & Woods modified model; grain moisture content; models identity; mathematical models.

Introdução

O feijão é muito importante para a alimentação humana devido ao seu equilíbrio nutricional, sendo uma das principais fontes de proteínas das populações de baixa renda. Este produto é cultivado em quase todos os países tropicais e subtropicais (MESQUITA et al., 2007; MENDES et al., 2011).

Das cerca de 160 espécies do gênero *Vigna*, apenas sete são cultivadas (VIEIRA et al., 1992). Dentre estas, o feijão-adzuki (*Vigna angularis*) é originário da China e é produzido principalmente nos países asiáticos. No Brasil, ainda é pouco conhecido, sendo cultivado, sobretudo, em colônias japonesas (VIEIRA et al., 2000).

Na fase de pós-colheita do feijão, a secagem 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 mudanças químicas e físicas que ocorrem nos grãos durante o armazenamento. No entanto, durante a secagem, em condições de temperatura e umidade relativa do ar que geram elevadas taxas de remoção de água, a qualidade dos grãos pode ser negativamente afetada (ALMEIDA et al., 2009; RESENDE et al., 2012; COSTA et al., 2012).

A secagem é um complexo processo que envolve uma transferência simultânea de calor e massa e que pode resultar em mudanças significativas na composição química, na estrutura e nas propriedades físicas dos alimentos (KOÇ et al., 2008). Segundo RAMOS et al. (2003), a redução do teor de água durante o processo de secagem proporciona uma redução no tamanho do tecido celular, fenômeno este que usualmente é chamado de contração volumétrica.

O índice de contração volumétrica determina a relação entre o volume dos grãos para cada teor de água e o volume inicial. Este índice é de fundamental importância para a avaliação da secagem em secadores, pois permite prever a variação do volume ocupado pela massa de grãos, conforme ocorre a redução do teor de água (SIQUEIRA et al., 2012). Segundo RAMOS et al. (2005), as modificações no produto referentes à sua contração volumétrica também devem ser incluídas nos modelos para completa descrição, precisão e análise do fenômeno de secagem.

RATTI (1994) e ZOGZAS et al. (1994) observaram que a contração volumétrica de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do teor de água, mas depende

também das condições do processo e da geometria do produto.

Para TOWNER (1987), o processo de contração volumétrica envolve complexas leis mecânicas e de deformação de materiais. No entanto, muitos pesquisadores têm utilizado aproximações e modelos empíricos na tentativa de representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (GONELI et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2011; MAYOR & SERENO, 2004).

Considerando o exposto e a carência de informações na literatura especializada, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki, ajustando modelos matemáticos aos valores experimentais.

Material e métodos

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, no Instituto Federal Goiano - Câmpus Rio Verde. Os grãos foram colhidos manualmente com teor de água inicial médio de 92,08% (% b.s.). Após a homogeneização e limpeza das amostras, o produto foi submetido à secagem em estufa com ventilação forçada, nas temperaturas de 40; 60 e 80 °C, e as umidades relativas dentro da estufa foram de 18,5; 8,6 e 3,8%, respectivamente.

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 final de, aproximadamente, 14,80 (% b.s.). O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi realizado, utilizando-se de uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Os teores de água do feijão-adzuki foram determinados pelo método de estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24 h, em três repetições (BRASIL, 2009).

Para a determinação do volume, os grãos de feijão foram considerados como esferoides triaxiais escalenos, sendo medidas as dimensões características (Figura 1) de 15 grãos durante a secagem, por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Os grãos foram secados em cápsulas de alumínio com dimensões de: 60,12 mm de diâmetro e 41,0 mm de altura.

Após determinadas suas dimensões características, o volume (V) dos grãos foi determinado de acordo com a seguinte expressão (MOHSENIN, 1986):

$$V = \frac{\pi a b c}{6} \quad (1)$$

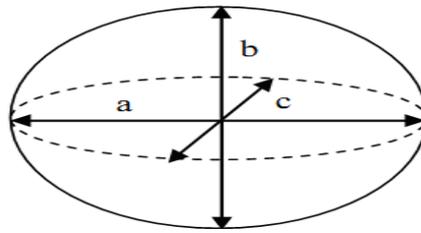


Figura 1 - Desenho esquemático do grão de feijão-adzuki, considerado esferoide, com suas dimensões características: a - maior dimensão; b - dimensão média; c - menor dimensão. *Schematic drawing of an adzuki bean grain, considered spheroid with its characteristic dimensions : a - largest; b - medium, and c - smallest.*

O índice de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki foi então obtido ao longo do processo de secagem, de acordo com a Equação (2). Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária foram ajustados os modelos matemáticos descritos pelas expressões listadas na Tabela 1.

$$\psi = \frac{V}{V_0} \tag{2}$$

Em que: ψ é o índice de contração volumétrica (decimal); V é o volume em cada teor de água (mm^3), e V_0 é o volume inicial (mm^3).

Tabela 1 - Modelos utilizados para modelar a contração volumétrica de produtos agrícolas. *Models used to simulate the rate of shrinkage of agricultural products.*

Referência	Modelo	
CORRÊA et al. (2004) – (Cor.)	$\psi = 1/(a + b \cdot \text{Exp}(X))$	(3)
Exponencial – (Exp.)	$\psi = a \cdot \text{Exp}(b \cdot X)$	(4)
Linear – (Lin.)	$\psi = a + b \cdot X$	(5)
Polinomial – (Pol.)	$\psi = a + b \cdot X + c \cdot X^2$	(6)
BALA & WOODS (1984) modificado	$\psi = 1 - a \cdot \{1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]\}$	(7)

Em que: X é o teor de água do produto (% b.s.); X_i é o teor de água inicial do produto (% b.s.); e a ; b e c são coeficientes dos modelos.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, realizou-se a análise de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton, e linear. Os modelos foram selecionados, considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), a magnitude dos erros médio relativo (P) e estimado (SE), bem como o teste do Qui-quadrado (χ^2).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \tag{8}$$

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

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \tag{10}$$

Em que: Y é o valor observado experimentalmente; \hat{Y} é o valor estimado pelo modelo; n é o número de observações experimentais, e GLR é o grau 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 dos grãos de feijão-adzuki, promoveu-se o teste da hipótese de igualdade dos modelos, utilizando a técnica de identidade de modelos descrita por REGAZZI (2003), que permite analisar a equivalência entre os modelos, objetivando o ajuste de uma única equação para descrição do fenômeno estudado.

Resultados e discussão

Na Tabela 2, estão apresentadas as equações de regressão para o índice de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki, em função do teor de água, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P) e estimado (SE) e qui-quadrado (χ^2).

Tabela 2 - Coeficientes de determinação (R^2), erros médio estimado (SE) e relativo (P), e teste de Qui-quadrado (χ^2) dos modelos utilizados para descrever a contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki. *Coefficients of determination (R^2), estimated (SE) and relative (P) mean error, and chi-square test of the used models to describe the unitary volumetric shrinkage of adzuki bean grains.*

Modelos	R^2 (%)	SE (decimal)	P (%)	χ^2 (decimal)
40 °C				
Exponencial	58,85	0,0583	4,65	0,0034
BALA & WOODS modificado	96,17	0,0178	1,54	0,0003
Linear	56,60	0,0598	4,75	0,0036
Polinomial	76,60	0,0481	3,98	0,0023
CORRÊA et al.	69,32	0,0495	3,57	0,0025
60 °C				
Exponencial	75,39	0,0424	3,50	0,0018
BALA & WOODS modificado	96,94	0,0150	1,23	0,0002
Linear	73,01	0,0444	3,64	0,0020
Polinomial	89,67	0,0301	2,28	0,0009
CORRÊA et al.	84,98	0,0314	2,18	0,0010
80 °C				
Exponencial	81,77	0,0401	3,37	0,0016
BALA & WOODS modificado	97,47	0,0149	1,21	0,0002
Linear	79,18	0,0428	3,56	0,0018
Polinomial	92,88	0,0274	2,20	0,0008
CORRÊA et al.	90,48	0,0276	1,81	0,0008

Em relação aos coeficientes de determinação (R^2) referentes aos modelos matemáticos ajustados, nota-se que apenas o modelo Bala & Woods modificado apresentou valores superiores a 96%. Segundo MADAMBA et al. (1996), o coeficiente de determinação não é um índice adequado para avaliação de modelos, sendo assim necessária a avaliação de outros parâmetros para a escolha do melhor modelo que descreva a variação do índice de contração volumétrica, durante a secagem.

Verificou-se que os cinco modelos apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10%, para as três condições testadas, indicando, de acordo com MOHAPATRA & RAO (2005), serem adequados para representação do fenômeno. Com relação ao erro médio estimado, os modelos apresentaram baixos valores, sendo relevantes para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. Para DRAPER & SMITH (1998), a capacidade de um modelo descrever com fidelidade um determinado processo físico é inversamente proporcional ao erro médio estimado (SE).

Em relação ao teste de qui-quadrado, nota-se que os cinco modelos analisados apresentaram valores significativos. Contudo, quanto menor o valor do qui-quadrado, melhor o ajuste do modelo (GÜNHAN et al., 2005). Desta

forma, o modelo de Bala & Woods modificado obteve não só os menores de P e SE, mas também de qui-quadrado para todas as temperaturas de secagem avaliadas.

A análise dos dados indicou que o modelo de Bala & Woods modificado se mostrou o mais adequado para a descrição matemática do fenômeno de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki, apresentando o maior coeficiente de determinação ajustado e valores reduzidos dos erros médios relativo, estimado e do teste de qui-quadrado.

CORRÊA et al. (2011) verificaram que o modelo de Bala & Woods modificado foi o modelo que melhor representou o processo de contração volumétrica das sementes de feijão sob diferentes condições psicrométricas do ar. RIBEIRO et al. (2005) e CORRÊA et al. (2006) também observaram que o modelo de Bala & Woods foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de contração volumétrica dos grãos de soja e trigo em função do teor de água, respectivamente.

Na Tabela 3, estão apresentados os coeficientes do modelo de Bala & Woods ajustados aos dados experimentais do índice de contração volumétrica dos grãos de feijão-adzuki submetidos a secagem em diferentes temperaturas.

Tabela 3 - Coeficientes do modelo de Bala & Woods modificado ajustado para o índice de contração volumétrica dos grãos de feijão-adzuki nas diferentes condições de secagem. *Coefficients of the modified Bala & Woods model adjusted to the volumetric shrinkage index of adzuki bean grains during drying under different drying conditions.*

Coeficientes	Temperaturas (°C)		
	40	60	80
a	0,2348**	0,2297**	0,2576**
b	0,1772 ^{ns}	0,0699**	0,5544**

^{ns} Não significativo e ** significativo a 1%, pelo teste de t.

Nota-se que apenas o valor do coeficiente b para a temperatura de 40 °C do modelo Bala & Woods modificado não foi significativo pelo teste de “t”. Ainda na Tabela 3, verifica-se que os coeficientes a e b variaram em função da temperatura de secagem. Devido a este fato, pode-se inferir que a contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki ocorreu diferentemente para as condições de secagem avaliadas. SIQUEIRA et al. (2011), estudando a contração volumétrica dos frutos de pinhão-mansão nas temperaturas de 45; 60; 75; 90 e 105 °C, verificaram este comportamento para o modelo Bala & Woods modificado.

Desta forma, procedeu-se ao teste de identidade de modelos objetivando viabilizar o uso de um único modelo de Bala e Woods modificado para a representação da contração unitária dos grãos de feijão-adzuki, independentemente da temperatura.

Para o modelo de Bala & Woods, obtêm-se as seguintes expressões:

Ω : espaço paramétrico sem restrição ou modelo completo

$$Y_{ij} = D_1 \cdot [1 - a_1 [1 - \text{Exp}[-b_1(X_i - X)]]] + D_2 \cdot [1 - a_2 [1 - \text{Exp}[-b_2(X_i - X)]]] + D_3 \cdot [1 - a_3 [1 - \text{Exp}[-b_3(X_i - X)]]] \quad (11)$$

w_1 : espaço paramétrico restrito por: $a_1 = a_2 = a_3$ e $b_1 = b_2 = b_3$;

$$Y_{ij} = D_1 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] + D_2 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] + D_3 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] \quad (12)$$

w_2 : espaço paramétrico restrito por: $a_1 = a_2$ e $b_1 = b_2$;

$$Y_{ij} = D_1 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] + D_2 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] \quad (13)$$

w_3 : espaço paramétrico restrito por: $a_1 = a_3$ e $b_1 = b_3$;

$$Y_{ij} = D_1 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] + D_3 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] \quad (14)$$

w_4 : espaço paramétrico restrito por: $a_2 = a_3$ e $b_2 = b_3$;

$$Y_{ij} = D_1 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] + D_3 \cdot [1 - a [1 - \text{Exp}[-b(X_i - X)]]] \quad (15)$$

A regra de decisão baseou-se no teste de qui-quadrado (χ^2), de acordo com a seguinte expressão:

$$\chi^2_{\text{calculado}} = -N \ln \left(\frac{SQR_{\Omega}}{SQR_{w_i}} \right) \quad (16)$$

Em que: N é o número de observações; SQR_{Ω} é a soma dos quadrados residuais do modelo

Os parâmetros do modelo de Bala & Woods modificado, para a contração volumétrica unitária nas temperaturas de 40 (a_1 e b_1), 60 (a_2 e b_2) e 80 °C (a_3 e b_3), foram comparados entre si para verificar sua igualdade. As seguintes hipóteses foram formuladas:

$H_0^{(1)}$: $a_1 = a_2 = a_3 = a$ versus $H_a^{(1)}$: nem todos a_i são iguais;

$H_0^{(2)}$: $b_1 = b_2 = b_3 = b$ versus $H_a^{(2)}$: nem todos b_i são iguais;

$H_0^{(3)}$: $a_1 = a_2 = a_3 = a$ e $b_1 = b$ versus $H_a^{(3)}$: existe pelo menos uma desigualdade.

Segundo REGAZZI (2003), para a 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.

completo, e o SQR_{w_i} é a 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 do modelo dado pela expressão:

$$v = P_{\Omega} - P_{w_i} \quad (17)$$

Em que: ν é o grau de liberdade do modelo; PQ é o número de parâmetros do modelo completo, e P_{wi} é o número de parâmetros do modelo com restrição.

Inicialmente, foram testadas as três condições de ar que apresentavam as temperaturas de 40; 60 e 80 °C. Em seguida, as condições de ar foram comparadas em pares.

Na Tabela 4, estão apresentados os resultados das hipóteses analisadas pelo teste de qui-quadrado.

Verificou-se que apenas o valor de $\chi^2_{\text{calculado}}$ do índice de contração unitária dos grãos de feijão-adzuki, para as temperaturas de 60 e 80 °C, foi menor que o valor de χ^2_{tabelado} . Assim, aceitou-se a hipótese formulada (H_0), ou seja, os modelos Bala & Woods modificado analisados para a determinação da contração

unitária dos grãos de feijão-adzuki secados nas temperaturas de 60 e 80 °C não diferem estatisticamente entre si, podendo ser utilizado um único modelo para as duas temperaturas estudadas.

Nas demais combinações, o valor de $\chi^2_{\text{calculado}}$ foi maior que os valores de χ^2_{tabelado} . Assim, rejeitou-se a hipótese formulada (H_0); logo, a contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki ocorre diferentemente para a temperatura de 40 °C e para combinações com a presença desta temperatura.

Na Figura 2, estão apresentados os valores do índice de contração volumétrica (Ψ_g) do feijão-adzuki, experimentais e estimados pelo modelo de Bala & Woods para a temperatura de 40 °C, em função da redução do teor de água.

Tabela 4 - Teste das hipóteses (H_0) utilizando o teste de qui-quadrado para o índice de contração unitária dos grãos de feijão-adzuki. *Hypotheses test (H_0) making use of the chi-square test for the unitary contraction index of adzuki bean grains.*

Hipóteses	GL	χ^2_{tabelado}	$\chi^2_{\text{calculado}}$
40 e 60 °C	2	5,991	8,978*
40 e 80 °C	2	5,991	9,088*
60 e 80 °C	2	5,991	5,590 ^{ns}
40, 60 e 80 °C	4	9,488	15,162*

*Significativo a 0,05 de significância, pelo teste de qui-quadrado; ^{ns}Não significativo.

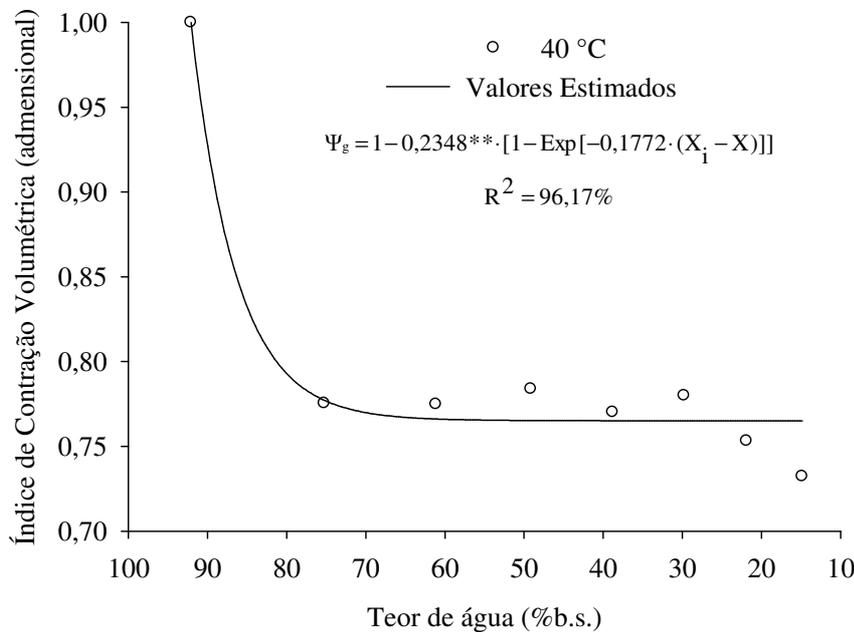


Figura 2 - Valores do índice de contração volumétrica (Ψ_g) do feijão-adzuki, experimentais e estimados pelo modelo de Bala & Woods modificado para a temperatura de 40 °C, em função da redução do teor de água. *Bala & Woods model experimental and estimated volumetric contraction index values (Ψ_g) of adzuki bean grains submitted to a drying temperature of 40 °C determined by moisture content reduction.*

Verifica-se que o índice de contração volumétrica para a temperatura de 40 °C, no intervalo de teor de água de 92 a 75 (% b.s.), apresentou uma redução do volume inicial de 22,5%. Já o índice de contração volumétrica unitária final, com teor de água de aproximadamente 14,80 (% b.s.), foi de 26,8%, indicando que o início da secagem proporcionou maior contração volumétrica; posteriormente, a contração diminuiu devido ao menor teor de água.

SIQUEIRA et al. (2012), CORRÊA et al. (2006) e RESENDE et al. (2005), estudando a

secagem de frutos de pinhão-manso, grãos de trigo e de feijão, respectivamente, também observaram que a contração volumétrica unitária ocorreu com maior intensidade no início da secagem.

Os valores do índice de contração volumétrica (Ψ_g) do feijão-adzuki, experimentais e estimados pelo modelo de Bala & Woods modificado para as temperaturas de 60 e 80 °C, em função da redução do teor de água, estão apresentados na Figura 3.

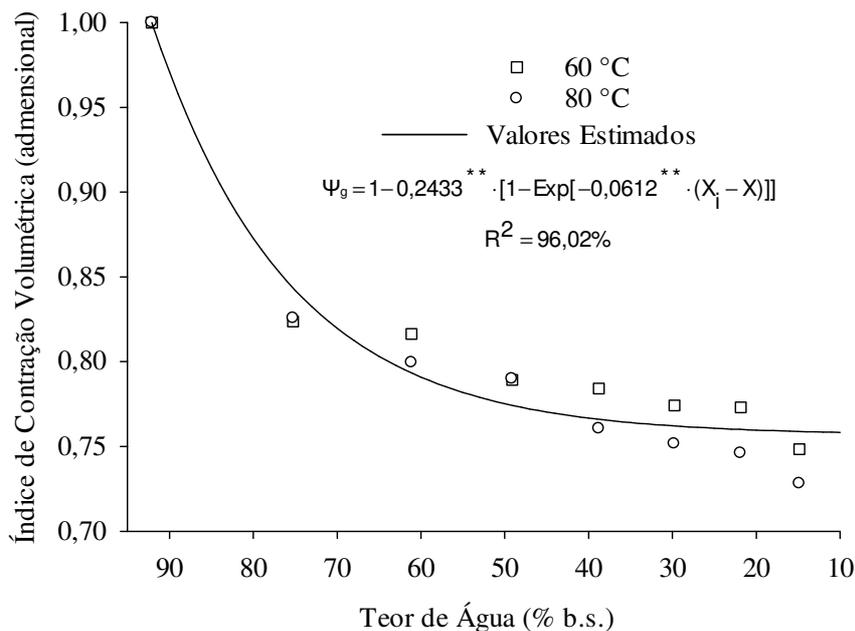


Figura 3 - Valores do índice de contração volumétrica (Ψ_g) do feijão-adzuki, experimentais e estimados pelo modelo de Bala & Woods modificado para as temperaturas de 60 e 80 °C, em função da redução do teor de água. *Bala & Woods model experimental and estimated volumetric contraction index values (Ψ_g) of adzuki bean grains submitted to the drying temperatures of 60 and 80 °C determined by moisture content reduction.*

Observa-se que os grãos de feijão-adzuki apresentaram uma contração volumétrica unitária de 25,2 e 27,2% para as temperaturas de 60 e 80 °C, respectivamente, em relação ao volume inicial, para o teor de água variando de 92,09 a 14,80% (% b.s.).

CORRÊA et al. (2011) observaram, pela taxa de contração volumétrica, que as sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), sofreram, durante a secagem, em torno de 25 a 37% de redução. Segundo os pesquisadores, este efeito foi basicamente em função do teor de água final e independentemente das condições do ar de secagem.

Conclusões

A temperatura e o teor de água influenciam sobre o índice de contração volumétrica unitária dos grãos de feijão-adzuki.

O modelo Bala & Woods representa, satisfatoriamente, a contração unitária dos grãos de feijão-adzuki, independentemente da condição de secagem. A contração dos grãos para as temperaturas de 60 e 80 °C pode ser representada por um único modelo.

Referências

- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.2, n.1, p.72-83, 2009.
- BALA, B. K.; WOODS, J. L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Londres, v.30, n.3, p.235-244, 1984.

- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 395p.
- 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: **Proceeding of the 14th INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM**, 14, 2004, São Paulo. Proceedings... v.A, p.742-747.
- CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GARIN, S. A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G. H. H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v.31, n.4, p.716-726, 2011.
- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D. N.; SOUZA, K. A.; SALES, J. F.; DONADON, J. R. The influence of drying on the physiological quality of crambe fruits. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.34, n.2, p.213-218, 2012.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3rded. New York: John Wiley and Sons, 1998. 712p.
- 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**, Maringá, 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**, Oxford, 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**, Essex, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.61, n.3, p.373-386, 2004.
- MENDES, U. C.; RESEDE, O.; ALMEIDA, D. P. Form, size and volumetric expansion of Adzuki beans (*Vigna angularis*) during soaking. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.31, n.3, p.703-709, 2011.
- MESQUITA, F. R.; CORRÊA, A. D.; ABREU, C. M. P.; LIMA, R. A. Z.; ABREU, A. F. B. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.4, p.1114-1121, 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.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- KOÇ, B.; EREN, I.; ERTEKIN F. K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.85, n.3, p.340-349, 2008.
- RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, Londres, v.9, n.3, p.201-206, 2003.
- 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**, Essex, v.67, n.1, p.195-203, 2005.
- RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.23, n.1, p.91-105, 1994.
- REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v.50, n.287, p.9-26, 2003.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.7, n.1, p.15-24, 2005.
- RESENDE, O.; ALMEIDA, D. P.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Adzuki beans (*Vigna angularis*) seed quality under several drying conditions. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.32, n.1, p.151-155, 2012.

- 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**, Campinas, v.25, n.3, p.611-617, 2005.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Contração volumétrica dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem em diversas temperaturas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, 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**, Maringá, v.34, n.3, p.231-238, 2012.
- TOWNER, G. D. The tensile stress generated in clay through drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Londres, v.37, n.3-4, p.279-289, 1987.
- VIEIRA, R. F.; VIEIRA, C.; ANDRADE, G. A. Comparações agronômicas de feijões dos gêneros *Vigna* e *Phaseolus* com o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.6, p.841-850, 1992.
- VIEIRA, R. F.; VIEIRA, C.; MOURA, W. M. Comportamento do feijão Azuki em diferentes épocas de plantio em Coimbra e Viçosa, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v.47, p.411-420, 2000.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; KOURIS, D. M., Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, New York, v.12, n.7, p.1653-1666, 1994.