

**NOTA TÉCNICA:****MODELAGEM MATEMÁTICA DA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GRÃOS DE SOJA DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM**Fernando Mendes Botelho¹, Michele Rosemari Hauth², Renata Henrique Hoscher³ & Sílvia de Carvalho Campos Botelho⁴

1- Engenheiro Agrícola, Professor adjunto da UFMT/Sinop-MT, fernando_eaa@yahoo.com.br;

2- Engenheira Agrícola e Ambiental, Mestranda em Engenharia Agrícola UFGD/Dourados-MS, michele.r.hauth@hotmail.com;

3- Engenheira Agrícola e Ambiental, Mestranda em Engenharia Agrícola UFGD/Dourados-MS, renatahoscher@hotmail.com;

4- Engenheira Agrônoma, Pesquisadora na Embrapa Agrossilvipastoril/Sinop-MT, silvia.campos@embrapa.br.

Palavras-chave:

Dimensões características

Glycine max

teor de umidade

volume

RESUMO

A determinação e a quantificação do índice de contração volumétrica podem contribuir para a otimização do processo de secagem, visto que este índice permite prever o volume ocupado pela massa de grãos. Assim, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a contração volumétrica de grãos de soja durante o processo de secagem e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais obtidos em função do teor de água. Utilizou-se grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR, com média do teor inicial de água de 0,30 base seca (b.s.). Os grãos foram submetidos à secagem numa estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, até atingirem um teor de água de pelo menos 0,15 (b.s.). A redução do volume foi analisada em função do teor de água por meio de diferentes modelos matemáticos que foram ajustados aos dados observados, por meio da avaliação da magnitude do erro cometido na estimação dos valores de contração volumétrica. Os modelos Bala e Woods adaptado e Polinomial, para a variedade NS7901RR, e Corrêa, Exponencial, Linear, Lozano, Mayor e Polinomial, para a variedade TMG132RR, foram os que apresentaram os melhores ajustes aos dados de contração volumétrica observados da tanto aparente quanto unitária nas diferentes temperaturas do ar de secagem utilizadas.

Keywords:

characteristic dimensions

Glycine max

moisture content

volume

MATHEMATICAL MODELING OF THE VOLUMETRIC SHRINKAGE OF SOYBEANS DURING THE DRYING PROCESS**ABSTRACT**

The determination and quantification of the volumetric shrinkage rate can help to optimize the drying process, because this rate enables the prediction of the volume occupied by grain mass. Thus, this study aimed to evaluate the volumetric shrinkage of soybeans during the drying process and to adjust different mathematical models to the experimental values obtained because of water content. It was used NS7901RR and TMG132RR soybeans varieties, with initial water content of 0.30 dry basis (d.b.). The soybeans were dried in an oven with a forced air flow at 40, 50, and 60 °C temperatures until they reach a water content of at least 0.15 (db). The volume reduction was analyzed relating it to the water content by different mathematical models that were adjusted according to the observed data by evaluating the magnitude of the error made in estimation of volumetric shrinkage values. The models Bala & Woods adapted and Polynomial, for NS7901RR variety, and Corrêa, Exponencial, Linear, Lozano, Mayor, and Polynomial for the TMG132RR variety were the models that best demonstrated to fit the observed data of volumetric shrinkage, apparently and unitary in the different used drying air temperatures.

INTRODUÇÃO

A soja, *Glycine max* (L.) Merrill, é uma das mais importantes aleuro-oleaginosas em produção sob cultivo extensivo no mundo (EMBRAPA, 2010). No agronegócio brasileiro, a cultura da soja assumiu grande importância econômica, pois, além do seu valor como grão para consumo, também apresenta grandes possibilidades de utilização devido aos seus altos teores de óleo e proteína e, também, à boa valorização comercial de seus resíduos.

A produção de grãos de alta qualidade depende de diversos fatores, dentre eles, as etapas de colheita e pós-colheita da cultura. A máxima qualidade do grão ocorre no estágio de maturação fisiológica. Neste sentido, o intervalo entre este estágio e a colheita deve ser o menor possível, devido, principalmente, o grau de deterioração do produto ser mínimo ou inexistente. Normalmente, quanto menor for este intervalo, o produto apresentará teores de água elevados para um armazenamento seguro e eficiente.

Desta forma, a secagem é uma das principais etapas da pós-colheita quando se visa a estabilidade do alimento. A redução do teor de água consiste em processos simultâneos de transferência de calor e massa, que podem modificar a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (COSTA et al., 2012). Nesse sentido, RESENDE et al. (2012) salientaram que, se a secagem for mal conduzida, a qualidade do produto pode ser negativamente afetada, devido, principalmente, às condições de temperatura e umidade relativa do ar.

A perda de água causa danos nas estruturas celulares do produto e, em consequência, proporciona alterações na sua forma e decréscimo em suas dimensões (GONELI et al., 2011). Desse modo, muitos autores têm estudado a influência da variação do teor de água em produtos agrícolas durante a secagem, como: abóbora (MAYOR et al., 2011); pinhão-mansão (SIQUEIRA et al., 2013); crambe (GONÇALVES et al., 2014); amendoim (ARAUJO et al., 2015); dentre outros.

A diminuição do tamanho do produto

(fenômeno macroscópico) é reflexo da redução de suas dimensões celulares (fenômeno microscópico) devido à perda de água, sendo tal fenômeno denominado de contração volumétrica (RAMOS et al., 2005). Além disso, este fenômeno pode ser descrito de duas formas: no caso de grãos e sementes. Quando o estudo é feito individualmente em cada grão, tem-se a contração volumétrica unitária. Se a avaliação é feita na massa de grãos, tem-se a contração volumétrica aparente.

Este fenômeno não está relacionado apenas ao teor de água, depende também das condições do processo de secagem, da forma e do tamanho do produto (RATTI, 1994). Além destas, outras variáveis podem influenciar a contração volumétrica final sofrida pelo produto, como os tratamentos fitotécnicos utilizados na condução da cultura ou a variedade utilizada, tema do estudo deste trabalho.

SIQUEIRA et al. (2012) e RESENDE et al. (2012), enfatizando a importância do estudo da contração volumétrica, afirmaram que, conforme o processo de secagem ocorre, é possível prever o volume ocupado pela massa de grãos, sendo tal informação fundamental para o desenvolvimento de secadores e equipamentos de secagem.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a contração volumétrica aparente e unitária de grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR, durante o processo de secagem, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais obtidos, em função do teor de água.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Qualidade e Pós-Colheita da Universidade Federal de Mato Grosso, no município de Sinop, MT. Para a realização do experimento, utilizaram-se grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR, com ciclos de produção esperados de 110 a 132 e 118 a 122 dias, respectivamente. Ambas as variedades foram cultivadas segundo tratamentos fitotécnicos normalmente utilizados na safra 2014/2015 em propriedades agrícolas localizadas no município de Sinop – MT.

Inicialmente, os grãos foram limpos e selecionados, sendo retirados os avariados e os materiais estranhos. Os grãos de soja, de ambas as variedades, apresentaram, em média, teor inicial de água de 0,30 base seca (b.s.). O teor inicial de água foi determinado utilizando-se o método da estufa a $105 \pm 1^\circ \text{C}$ durante 24 h, com três repetições (BRASIL, 2009).

Os grãos foram submetidos à secagem em uma estufa com circulação de ar forçada, regulada nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. A secagem foi realizada em bandejas de chapas galvanizadas, perfuradas ($\varnothing = 2,5 \text{ mm}$), com dimensões médias de $320 \times 260 \times 50 \text{ mm}$, contendo inicialmente 1 L de grãos, cada uma. O acompanhamento da secagem se deu por diferença de massa, conhecendo-se o teor inicial de água do produto. A secagem era interrompida quando as amostras atingiam o teor final de água igual ou inferior a 0,15 (b.s.).

A massa das amostras foi medida em uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Ao longo do processo, para teores de água de interesse, a secagem foi interrompida e o volume da amostra determinada, a fim de se avaliar a contração volumétrica.

A contração volumétrica unitária (de cada grão) e a aparente (da massa de grãos) foram avaliadas durante o processo de secagem pelo índice de contração volumétrica (ψ), que é a relação entre o volume para cada teor de água de interesse e o volume inicial.

Para a avaliação da contração volumétrica aparente, 1000 mL de grãos foram submetidos à secagem, sendo utilizada uma proveta graduada de $1000 \text{ mL} \pm 5 \text{ mL}$ para o acompanhamento da variação de volume da amostra. Já para a avaliação da contração volumétrica unitária, as dimensões características principais (Figura 1) de 12 grãos de soja, que foram secados e separados da massa de grão em um cadinho de alumínio, foram medidas por meio de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm ao longo do processo de secagem. O acompanhamento da secagem destes 12 grãos também se deu por diferença de massa, conhecendo-se o teor de água inicial do produto.

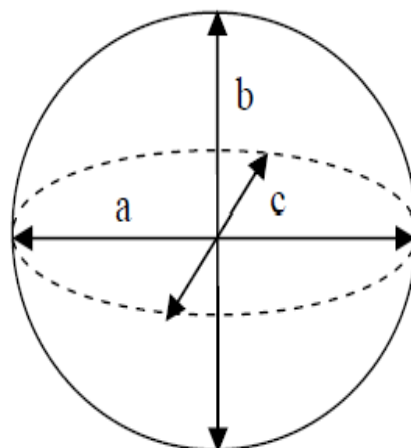


Figura 1. Desenho esquemático de um grão de soja, em que “a”, ” b”, ” c” são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do produto, respectivamente.

O volume do produto foi determinado pela Equação 1, considerando-se que os grãos de soja possuem o formato aproximado de um esferoide triaxial escaleno (MOHSENIN, 1986).

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

em que,

V_g = volume dos grãos, m^3 ;

a = maior dimensão característica dos grãos de soja, m;

b = dimensão característica média dos grãos de soja, m, e

c = menor dimensão característica dos grãos de soja, m.

Aos dados experimentais referentes à contração volumétrica dos grãos de soja, foram ajustados modelos matemáticos que são tradicionalmente utilizados por diversos autores, como KOÇ et al., 2008 (marmelos); CORRÊA et al., 2011 (feijão-vermelho); GONELLI et al., 2011 (mamona); CORRÊA FILHO et al., 2015 (figo); LEITE et al., 2015 (banana); CORADI et al., 2016 (milho) e outros, para a descrição da contração volumétrica de produtos agrícolas (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar a contração volumétrica unitária e aparente de produtos agrícolas

Descrição do modelo	Modelo	
Bala e Woods adaptado	$\psi = 1 - A \{1 - \exp[B (U_0 - U)]\}$	(2)
Corrêa	$\psi = 1/(A + B \exp(U))$	(3)
Exponencial	$\psi = A \exp(B U)$	(4)
Lang e Sokhansanj	$\psi = A + B(U - U_0)$	(5)
Linear	$\psi = A + B U$	(6)
Lozano	$\psi = A + B (U/U_0) + D \exp(X/(Y + U))$	(7)
Mayor	$\psi = A + B(U/U_0) + D (U/U_0)^2$	(8)
Polinomial	$\psi = A + B U + C U^2$	(9)
Rahman	$\psi = 1 + \beta(U - U_0)$	(10)

em que,

U = teor de água dos grãos para um dado instante, decimal;

U₀ = teor inicial de água dos grãos, decimal;

A, B, C, X e Y = parâmetros de ajuste que dependem do produto; e

β = coeficiente de contração volumétrica, adimensional.

O ajuste dos modelos matemáticos foi realizado por meio de análise de regressão linear e não-linear pelo método Gauss Newton, onde 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 apresentaram valores de erro médio relativo menores que 10% (MOHAPATRA & RAO, 2005). Os valores de SE e P para cada modelo foram calculados pelas Equações 11 e 12, respectivamente:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (11)$$

em que,

Y = valor observado experimentalmente;

\hat{Y} = valor estimado pelo modelo; n - número de observações experimentais; e

GLR = graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Além do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa, foi considerado ainda a magnitude do coeficiente de determinação (R²) e a tendência da distribuição dos resíduos, que são as diferenças entre os valores observados experimentalmente e os estimados pelo modelo, representados como uma função dos níveis estimados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2 e 3, estão apresentados os índices estatísticos utilizados para a avaliação dos modelos ajustados aos valores experimentais de contração volumétrica unitária e aparente de grãos de soja, em função do teor de água das variedades NS7901RR e TMG132RR, respectivamente.

Observa-se, nas Tabelas 2 e 3, que todos os modelos apresentaram baixos valores de desvio padrão da estimativa (SE) e de erro médio relativo (P). Os modelos ajustados aos dados de contração volumétrica da variedade NS7901RR apresentaram valores de SE variando entre 0,002 e 0,011; enquanto que para a variedade TMG132RR, os valores de SE variaram entre 0,003 e 0,016. O uso do desvio padrão da estimativa é interessante

Tabela 2. Desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R²) e distribuição Residual (DR) - sendo aleatórios (A) ou tendenciosos (T), dos modelos utilizados para descrever a contração volumétrica aparente e unitária de grãos de soja da variedade NS7901RR durante a secagem

Temperatura (°C)	Modelos	Contração Volumétrica Aparente				Contração Volumétrica Unitária			
		SE	P (%)	R ² (%)	DR	SE	P (%)	R ² (%)	DR
40	(2)	0,004	0,360	99,42	A	0,004	0,321	98,70	A
	(3)	0,004	0,339	99,41	A	0,004	0,338	98,67	A
	(4)	0,004	0,384	99,35	A	0,003	0,320	98,81	A
	(5)	0,004	0,362	99,34	A	0,003	0,312	98,84	A
	(6)	0,004	0,412	99,28	A	0,003	0,312	98,84	A
	(7)	0,003	0,257	99,71	A	0,004	0,288	98,86	A
	(8)	0,003	0,277	99,69	A	0,004	0,297	98,85	A
	(9)	0,004	0,335	99,42	A	0,004	0,297	98,88	A
	(10)	0,004	0,371	99,33	T	0,003	0,321	98,70	A
	50	(2)	0,007	0,689	99,18	A	0,007	0,599	96,99
(3)		0,010	1,091	98,15	A	0,009	0,868	94,43	T
(4)		0,011	1,092	98,11	A	0,010	0,915	93,75	T
(5)		0,008	0,726	99,00	A	0,010	0,935	93,43	T
(6)		0,011	1,116	97,96	A	0,010	0,935	93,43	T
(7)		0,006	0,503	99,46	A	0,010	0,808	94,61	T
(8)		0,008	0,819	98,86	A	0,007	0,631	97,03	T
(9)		0,011	1,086	98,18	A	0,007	0,631	97,03	A
(10)		0,009	0,832	98,56	T	0,014	1,241	86,33	T
60		(2)	0,003	0,298	99,77	A	0,005	0,497	97,21
	(3)	0,003	0,309	99,75	A	0,005	0,516	96,87	A
	(4)	0,003	0,317	99,73	A	0,006	0,528	96,65	A
	(5)	0,004	0,360	99,65	A	0,006	0,533	96,54	A
	(6)	0,004	0,360	99,65	A	0,006	0,533	96,54	A
	(7)	0,002	0,210	99,85	A	0,007	0,472	97,27	A
	(8)	0,003	0,293	99,78	A	0,005	0,471	97,27	A
	(9)	0,003	0,293	99,78	A	0,005	0,471	97,27	A
	(10)	0,004	0,346	99,59	A	0,006	0,511	96,33	A

por medir o erro cometido pelo modelo na mesma unidade física da variável estimada.

De modo geral, para a variedade NS7901RR, os modelos apresentaram para a temperatura de 50 °C, tanto para a modelagem da contração volumétrica aparente quanto unitária, os maiores valores do desvio padrão da estimativa (SE), proporcionalmente à amplitude total do índice avaliado (ψ) que é de 0 a 1. Observação que também pode ser verificada durante a secagem da variedade TMG132RR para a contração

volumétrica aparente.

Diferentemente da avaliação feita para o desvio padrão da estimativa (SE), para o erro médio relativo (P) há uma recomendação, frequentemente descrita na literatura, que a magnitude desse índice deve ser inferior à 10% (CAMICIA et al., 2015; SANTOS et al., 2013; FARIA et al., 2012; GONELI et al., 2014; MENEGHETTI et al., 2012), para se julgar adequado o ajuste de modelos não-lineares aos dados experimentais, caso deste trabalho para todos os modelos avaliados. Sendo assim, percebe-

Tabela 3. Desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R^2) e distribuição Residual (DR) - sendo aleatórios (A) ou tendenciosos (T), dos modelos utilizados para descrever a contração volumétrica aparente e unitária de grãos de soja da variedade TMG132RR durante a secagem

Temperatura (°C)	Modelos	Contração Volumétrica Aparente				Contração Volumétrica Unitária			
		SE	P (%)	R^2 (%)	DR	SE	P (%)	R^2 (%)	DR
40	(2)	0,005	0,462	99,45	T	0,007	0,489	96,22	A
	(3)	0,006	0,496	99,23	A	0,007	0,539	96,02	A
	(4)	0,006	0,553	99,12	A	0,007	0,509	96,32	A
	(5)	0,005	0,479	99,33	T	0,007	0,497	96,34	A
	(6)	0,007	0,591	98,99	A	0,007	0,497	96,34	A
	(7)	0,003	0,268	99,80	A	0,007	0,449	97,57	A
	(8)	0,004	0,356	99,66	A	0,009	0,521	94,04	A
	(9)	0,006	0,486	99,27	A	0,007	0,479	96,36	A
	(10)	0,005	0,500	99,32	T	0,004	0,275	96,22	A
	50	(2)	0,005	0,451	99,18	A	0,004	0,319	94,95
(3)		0,015	1,543	93,79	A	0,005	0,402	91,29	A
(4)		0,015	1,528	93,93	A	0,005	0,414	90,90	A
(5)		0,005	0,457	99,19	A	0,005	0,418	90,78	A
(6)		0,015	1,524	93,93	A	0,005	0,418	90,78	A
(7)		0,005	0,458	99,29	A	0,006	0,337	94,62	A
(8)		0,009	0,768	98,08	A	0,004	0,330	94,76	A
(9)		0,016	1,524	93,94	A	0,004	0,330	94,76	A
(10)		0,005	0,452	99,18	A	0,006	0,435	87,72	A
60		(2)	0,005	0,454	99,46	A	0,004	0,303	95,13
	(3)	0,013	1,277	96,85	A	0,004	0,286	96,41	A
	(4)	0,013	1,242	97,03	A	0,003	0,283	96,44	A
	(5)	0,005	0,473	99,45	A	0,003	0,282	96,44	A
	(6)	0,013	1,233	97,03	A	0,003	0,282	96,44	A
	(7)	0,006	0,480	99,47	A	0,007	0,282	96,44	A
	(8)	0,007	0,557	99,13	A	0,004	0,278	96,45	A
	(9)	0,014	1,237	97,04	A	0,004	0,278	96,45	A
	(10)	0,005	0,475	99,44	A	0,004	0,294	94,20	A

se que a magnitude do erro cometido pelos modelos, avaliada pelo erro médio relativo, também pode ser considerada baixa, visto que todos os modelos ajustados apresentaram valores satisfatórios para esse índice.

No que se refere a distribuição de resíduos para a contração volumétrica aparente, verificou-se que, para a variedade NS7901RR, todos os modelos, à exceção de Lang e Sokhansanj (5) e Rahman (10), apresentaram distribuição aleatória dos resíduos. Para a variedade TMG132RR, observou-se que,

de todos os modelos ajustados, apenas os modelos Bala e Woods (2) adaptado, Lang e Sokhansanj (5) e Rahman (10) apresentaram distribuição tendenciosa dos resíduos.

Para a contração volumétrica unitária, observou-se para a variedade NS7901RR que apenas os modelos Bala e Woods (2) adaptado e Polinomial (9) apresentaram distribuição de resíduos aleatória para todas as temperaturas de secagem, enquanto que para a variedade TMG132RR, todos os modelos apresentaram distribuição aleatória dos resíduos

para todas as condições de secagem utilizadas.

A avaliação pela distribuição dos resíduos é subjetiva, mas, normalmente, um modelo é considerado aceitável se os valores residuais se encontrarem em uma zona horizontal perto de zero, formando distribuições aleatórias. Se as distribuições dos resíduos formarem figuras geométricas, apresentarem regiões em que o modelo subestima ou superestima a condição real ou tenderem a se acumular em um ponto fora do eixo, a distribuição dos seus resíduos é considerada tendenciosa e o modelo passa a ser inadequado para representar o fenômeno em questão.

A Figura 2 apresenta um exemplo de distribuição de resíduos observado neste trabalho, sendo uma distribuição aleatória (A) e uma tendenciosa (B) para o modelo Polinomial e o modelo Rahman, respectivamente, no ajuste aos dados da contração volumétrica aparente da variedade NS7901RR na temperatura de 40 °C.

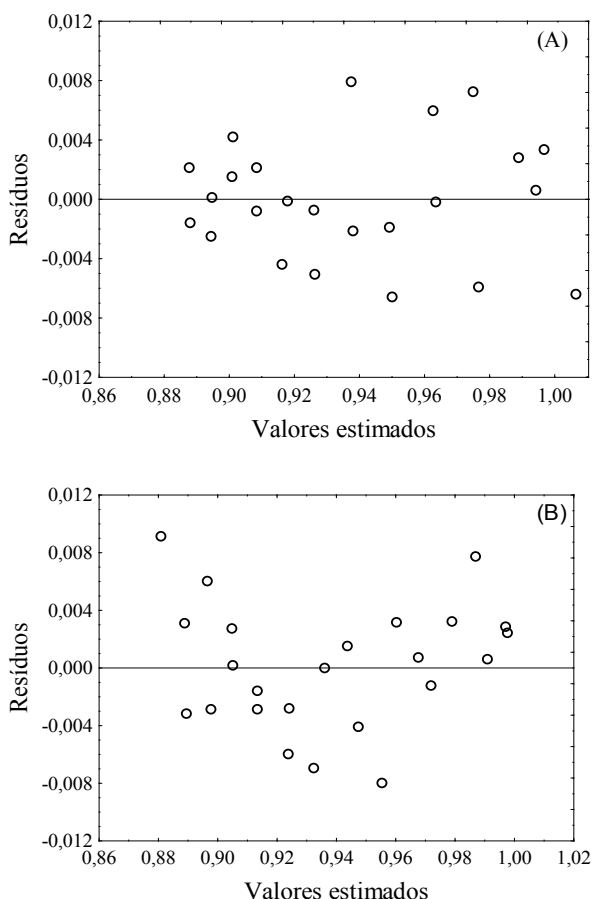


Figura 2. Exemplos de distribuição de resíduos aleatória (A) e tendenciosa (B) referente à modelagem da contração volumétrica aparente de grãos de soja da variedade NS7901RR.

Neste trabalho, buscou-se uma recomendação geral de modelos que descrevam tanto a contração volumétrica aparente quanto a unitária dos grãos de duas variedades de soja, em diferentes condições de secagem. Desse modo, selecionou-se, dentre os modelos propostos, apenas os que se mostraram adequados para descrever a contração volumétrica aparente unitária nas condições de secagem. Portanto, os modelos Bala e Woods (2) adaptado e Polinomial (9), para a variedade NS7901RR, e Corrêa (3), Exponencial (4), Linear (6), Lozano (7), Mayor (8) e Polinomial (9), para a variedade TMG132RR, foram os que apresentaram o melhor ajuste aos dados observados, sendo os recomendados para descrever a contração volumétrica tanto aparente quanto unitária nas diferentes temperaturas do ar de secagem utilizadas. Os coeficientes destes modelos ajustados aos dados experimentais, nas temperaturas de secagem utilizadas, estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Para a apresentação dos resultados estimados de contração volumétrica aparente e unitária de ambas as variedades, selecionou-se o modelo Polinomial devido à sua simplicidade e ao fato de ter sido o único modelo adequado para descrever este fenômeno em todas as condições analisadas. Expressões polinomiais são frequentemente descritas como viáveis para a modelagem da contração volumétrica de produtos agrícolas durante a secagem, como: mamona (GONELI et al., 2011), pinhão-mansão (SIQUEIRA et al., 2012), figo (CORRÊA FILHO et al., 2015), entre outros.

O modelo Polinomial, além de apresentar ajuste satisfatório nas diferentes temperaturas de secagem utilizadas e para ambas as variedades, apresentou ainda os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2), sendo sempre acima de 99,0% para contração volumétrica aparente e de 94,0% para unitária. Diferentemente do que ocorre com a avaliação de modelos não-lineares, o coeficiente de determinação é um índice importante a ser considerado em modelagens com modelos lineares, como o modelo Polinomial.

Tabela 4. Coeficientes dos modelos selecionados para a descrição da contração volumétrica aparente e unitária de grãos de soja da variedade NS7901RR

Temperaturas (°C)	Modelos	Contração Volumétrica Aparente			Contração Volumétrica Unitária		
		Coeficientes			Coeficientes		
		a	B	c	a	b	c
40	(2)	0,5511	1,6898	-	227,66	0,0034	-
	(9)	0,8227	0,3900	1,2682	0,8099	1,0801	0,8008
50	(2)	0,4277	2,7071	-	0,0975	21,237	-
	(9)	0,7665	0,4896	0,9639	0,9773	1,3026	6,5710
60	(2)	0,5144	2,0424	-	0,1250	7,2640	-
	(9)	0,7837	0,4861	1,0326	0,9361	0,3607	3,0027

Tabela 5. Coeficientes dos modelos selecionados para a descrição da contração volumétrica aparente e unitária de grãos de soja da variedade TMG132RR

	Modelos	Coeficientes	Temperaturas (°C)		
			40	50	60
			Contração Volumétrica Aparente	(3)	a
b	0,9399	0,9764			0,9447
(4)	a	0,7365		0,7793	0,7304
	b	1,0842		1,0838	1,0840
(6)	a	0,7151		0,7658	0,7092
	b	1,0045		1,0118	0,9970
(7)	a	1,9103		0,4452	0,2953
	b	0,3391		0,4486	0,4681
	c	1,2501		0,5809	0,0032
	x	0,0009		0,408	9,658
	y	0,113		0,522	1,953
(8)	a	0,8030		0,7724	0,7254
	b	0,0393		0,2034	0,2323
	c	0,1651		0,0265	0,0454
(9)	a	0,8005		0,7728	0,7206
	b	0,1628		0,9220	0,8827
	c	1,9759		0,2710	0,2709
Contração Volumétrica Unitária	(3)	a		1,6580	1,4491
		b	0,5197	0,3753	0,3183
	(4)	a	0,8655	0,9275	0,9341
		b	0,6109	0,4157	0,3578
	(6)	a	0,8595	0,9263	0,9330
		b	0,5934	0,4057	0,3508
	(7)	a	52,685	52,381	0,4152
		b	54,036	12,669	0,0683
		c	704,00	627,24	0,3727
		x	-1,686	-4,439	1,8451
		y	0,658	1,802	5,609
	(8)	a	0,8050	1,0186	0,9290
		b	0,2937	0,1855	0,0747
		c	0,0991	0,1679	0,0076
	(9)	a	0,8452	1,0186	0,9290
		b	0,7526	1,0913	0,4152
		c	0,4239	5,8130	0,2375

As Figuras 3 e 4 apresentam os valores observados e estimados pelo modelo Polinomial, para a descrição da variação volumétrica aparente (A) e unitária (B) dos grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR, respectivamente.

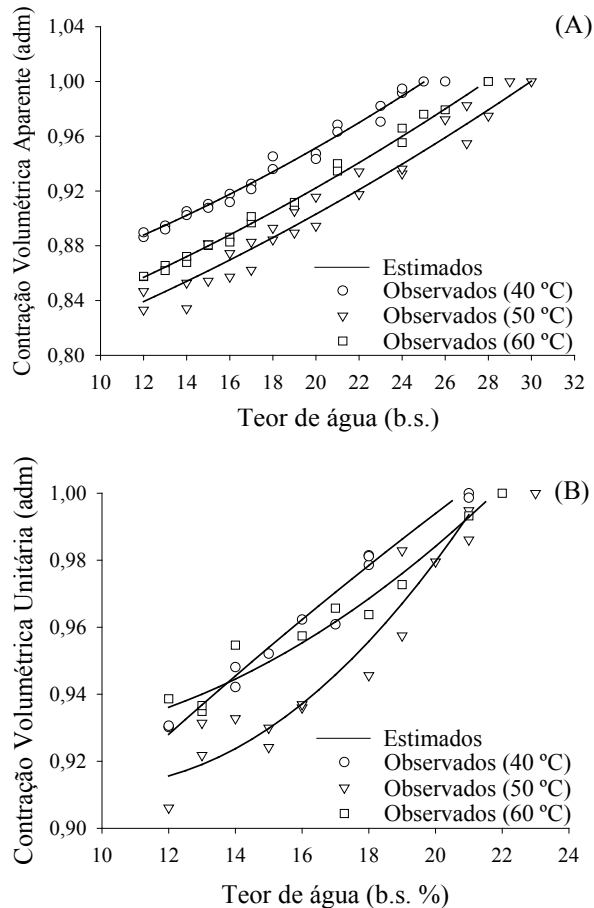


Figura 3. Valores observados e estimados da contração volumétrica aparente (A) e unitária (B) de grãos de soja da variedade NS7901RR pelo modelo Polinomial em função do teor de água para as temperaturas estudadas.

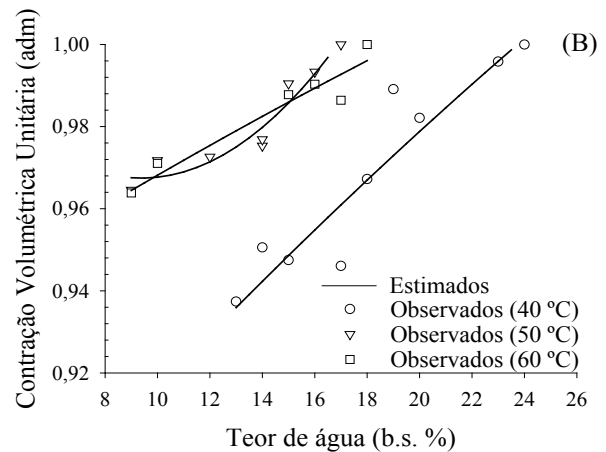
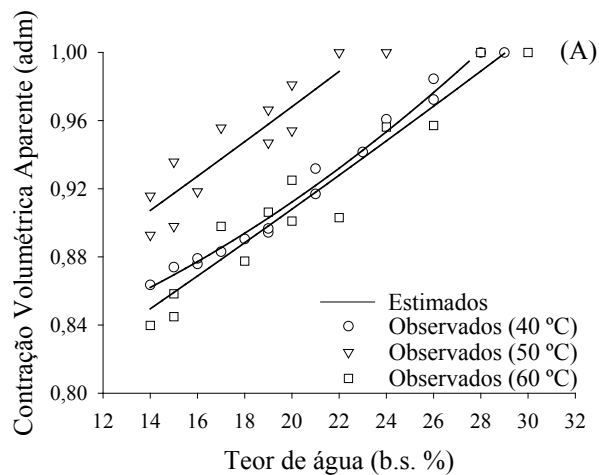


Figura 4. Valores observados e estimados da contração volumétrica aparente (A) e unitária (B) de grãos de soja da variedade TMG132RR pelo modelo Polinomial em função do teor de água para as temperaturas estudadas.

Observa-se, nas Figuras 3 e 4, que houve uma correspondência entre os dados observados e estimados pelo modelo Polinomial, em todas as condições analisadas, principalmente para a contração volumétrica aparente. Pelos resultados encontrados neste trabalho, é possível inferir que este modelo representa, de forma satisfatória, a variação volumétrica de outras variedades de soja e para temperaturas intermediárias às testadas.

Nota-se ainda que não houve relação direta entre temperatura do ar de secagem e o índice de contração volumétrica final, sendo tal fato também observado por outros autores, como OLIVEIRA et al. (2013) e SMANIOTTO et al. (2015) que estudaram a contração volumétrica de grãos de soja. Entretanto, RATTI (1994) afirma que a taxa de secagem pode apresentar influência sobre a intensidade do encolhimento. Altas temperaturas de secagem implicam em elevada taxa de secagem e, conseqüentemente, o processo de redução do teor de água ocorre de forma rápida, proporcionando ao material biológico uma rápida transição do estado elástico para o estado vítreo, acarretando uma redução na taxa de encolhimento, como foi observado por SIQUEIRA et al. (2012) e CORRÊA FILHO et al. (2015).

Na Tabela 6, estão apresentados os índices da contração volumétrica aparente e unitária dos grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR, para o teor final de água de 0,15 (b.s.).

Tabela 6. Índices da contração volumétrica aparente e unitária dos grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR ao final do processo de secagem

Temperatura °C	NS7901RR		TMG132RR	
	Contração Aparente	Contração Unitária	Contração Aparente	Contração Unitária
40	0,9077	0,9521	0,8740	0,9475
50	0,8817	0,9300	0,8980	0,9905
60	0,8806	0,9547	0,8583	0,9878

No que se refere à contração volumétrica aparente e conforme os dados apresentados na Tabela 6, nota-se que os grãos de soja da variedade NS7901RR apresentaram redução do volume inicial de 9,23, 11,83 e 11,94% para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Para os grãos de soja da variedade TMG132RR, a redução do volume inicial para as mesmas temperaturas de secagem foram de 12,6, 10,2 e 14,17%.

A contração volumétrica unitária dos grãos de soja da variedade NS7901RR, em relação ao volume inicial, foi de 4,79, 7,00 e 4,53%. Os grãos de soja da variedade TMG132RR apresentaram uma contração volumétrica de 5,25, 0,95 e 1,22%. Diante desses resultados, é possível observar que a contração volumétrica unitária foi menor do que aquela observada para a massa de grãos, para todas as temperaturas de secagem, assim como obtido por SMANIOTTO *et al.* (2015).

CONCLUSÕES

- Os modelos Bala e Woods adaptado e Polinomial são os que melhor se ajustam aos dados observados da contração volumétrica aparente e unitária da variedade NS7901RR, nas condições de secagem utilizadas.
- Para a variedade TMG132RR, os modelos Corrêa, Exponencial, Linear, Lozano, Mayor e Polinomial são os que melhor representam a contração volumétrica aparente e unitária dos grãos de soja, nas condições testadas.
- O modelo Polinomial é o que melhor se ajusta aos dados observados da contração volumétrica dos grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG132RR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; ORLANDO, R.C.; MARTINS, E.A.S.; HARTMANN FILHO, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. *Revista Caatinga*, Mossoró, v.28, n.4, p.170-180, 2015.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento 2009. Secretaria de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, DF, p.395.

CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, Mossoró, v.28, n.3, p.206-214, 2015.

CORADI, P.C.; MILANE, L.V.; ANDRADE, M.G.O.; CAMILO, L.J.; SOUZA, A.H.S. Secagem de grãos de milho do cerrado em um secador comercial de fluxos mistos. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, Tupã, v.10, n.1, p.14-26, 2016.

CORRÊA FILHO, L.C.; ANDRADE, E.T.; MARTINAZZO, A.P.; D'ANDREA, E.M.; SOUSA, F.A.; FIGUEIRA, V.G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise de difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.19, n.8, p.797-802, 2015.

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*,

Jaboticabal, 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*, Londrina, v.34, n.2, p.213-218, 2012.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. Desenvolvimento, Mercado e Rentabilidade da Soja Brasileira. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 2010. 19p. (Circular Técnica, 74).

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.5, p.573-583, 2012.

GONÇALVES, D.N.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; PRADO, M.C. Determination of physical properties of crambe fruits during drying. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.34, p.972-979, 2014.

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

GONELI, A.L.D.; NASU, A.K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W.D.; SARATH, K.L.L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, Campinas, v.16, n.2, p.434-443, 2014.

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*, Bornova, v.85, p.340-349, 2008.

LEITE, A.L.M.P.; SILVA, F.S.; PORTO, A.G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.45, n.2, p.155-162, 2015.

MAYOR, L.; MOREIRA, R.; SERENO, A.M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, Porto, v.103, p.29-37, 2011.

MENEGHETTI, V.L.; AOSANI, E.; ROCHA, J.C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C.; POHNDORF, R.S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.10, p.1115-1120, 2012.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v.66, p.513-518, 2005.

MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Publishers, New York, 1986. 841p.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; SIQUEIRA, V.C.; JOSÉ NETO, C.A. Alterações morfológicas em grãos de soja durante o processo de secagem. *Ciências Agrárias*, Londrina, v.34, n.3, p.975-984, 2013.

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*, Porto, v.67, p.195-203, 2005.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v.23, p. 91-105, 1994.

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.

SANTOS, D.C.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; OLIVEIRA, E.N.A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.17, n.2, p.223-231, 2013.

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.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Shape and size of jatropha beans (*Jatropha curcas* L.) during drying at different temperatures. *Revista Ceres*, Viçosa, v.60, n.6, p.820-825, 2013.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; SOARES, F.A.L. Forma e tamanho dos frutos

de pinhão-manso durante a secagem em cinco condições de ar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.8, p.864-870, 2012.

SMANIOTTO, T.A.S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; SIQUEIRA, V.C.; SOUSA, K.A. Ajuste de modelos matemáticos a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja. *Revista Agro@ambiente On-line*, Boa Vista, v.9, n.4, p.397-404, 2015.