

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SECAGEM EM CAMADA DELGADA DE SEMENTES DE MILHO DOCE (*Zea mays* L.)

PAULO CESAR CORRÊA¹, EDUARDO FONTES ARAÚJO², PAULO CESAR AFONSO JÚNIOR³

¹Eng. Agrônomo, D.S., Prof. Ajunto no Depto de Agricultura da Universidade Federal de Viçosa. CEP 36571-000 Viçosa, MG. E-mail: copace@mail.ufv.br (autor para correspondência)

²Eng. Agrônomo, D.S., Prof. Adjunto no DFT - Universidade Federal de Viçosa. CEP 36571-000 Viçosa, MG.

³Eng. Agrícola, D.S., Pesquisador da EMBRAPA, Brasília, DF.

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.2, n.2, p.110-119, 2003

RESUMO - A secagem é uma operação imprescindível para a produção de sementes e grãos de boa qualidade. Diante da escassez de informações na literatura especializada a respeito da cinética de secagem de sementes de milho doce em camada delgada, desenvolveu-se este trabalho, com o objetivo de determinar as curvas de secagem do produto e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais das cultivares BR 400 (Superdoce) e BR 402 (Doce Cristal), em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que as curvas de razão de umidade das sementes de milho doce, de ambas as cultivares analisadas, podem ser adequadamente descritas pelos modelos de Thompson e Page, com seus parâmetros ajustados em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem. O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem da cultivar Superdoce, enquanto o modelo de Thompson foi o que melhor representou esse processo para as sementes da cultivar Doce Cristal.

Palavras-chave: milho doce, secagem, modelos matemáticos.

DETERMINATION OF THE DRYING PARAMETERS IN THIN LAYER OF SWEET CORN (*Zea mays* L.) SEEDS

ABSTRACT - Drying is an indispensable operation for the production of good quality seeds and grains. Since there is little information available in the specialized literature regarding the seed drying kinetics of sweet corn in thin layer, the objective was to determine the drying curves of the product and to adjust different mathematical models for cultivars BR 400 (Superdoce) and BR 402 (Sweet Crystal), in function of the temperature and relative humidity of drying air. In agreement with the obtained results we concluded that the humidity ratio curves of the sweet corn seeds, for both cultivars analyzed, can be appropriately described by Thompson's models and Page, with their adjusted parameters in function of the temperature and relative humidity of the drying air. Page model was better adjusted to the drying data of Superdoce cultivar, while Thompson's model was the best for the seeds of Sweet Crystal cultivar.

Key words: sweet corn, drying, mathematical models.

O milho consumido in natura, no Brasil, constitui-se, em sua maioria, dos híbridos e cultivares utilizados para a colheita de grãos secos. Para a

industrialização, esses mesmos produtos foram e ainda são utilizados em grande quantidade. Entretanto, mudanças ocorridas no mercado consumidor têm

forçado as grandes indústrias do setor agrícola a investir na utilização do milho doce para o processamento.

O milho doce, utilizado principalmente como milho verde, tanto *in natura* como para processamento, difere do milho comum não por características taxonômicas, mas pelo alto conteúdo de açúcar e baixo teor de amido, ambos resultantes da ação de genes individuais ou associados, em combinações duplas ou triplas. Por essas características, o milho doce apresenta problemas de qualidade. Segundo Berger & Wolf (1974) e Halfon-Meiri & Solel (1990), a baixa qualidade das sementes está relacionada à infecção por patógenos, enquanto Wann (1980) se refere ao pequeno endosperma e Wilson Jr. & Trawatha (1991), à maturidade incompleta. Provavelmente, a fina espessura do pericarpo é outra característica das sementes de milho doce que contribui para sua qualidade inferior, por torná-las mais suscetíveis aos danos mecânicos e, possivelmente, aos danos térmicos durante a secagem. Diversos pesquisadores recomendam cuidados especiais nessa importante etapa de produção, que, se mal conduzida, pode comprometer a qualidade final do produto, o que acarretará grande prejuízo econômico para o produtor (Wann, 1980; Wilson Jr. & Trawatha, 1991; Pessoa, 1996).

O estudo do processo de secagem fornece informações sobre o comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem, normalmente ar atmosférico aquecido ou não, as quais são fundamentais para o projeto, operação e simulações de sistemas de secagem e secadores. A abordagem adequada para a investigação do processo de secagem é a análise em leito de camada delgada, o qual pode ser considerado um elemento de volume do leito de camada espessa, em que a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, que atravessa a massa de produto, podem ser consideradas constantes.

De acordo com Beker *et al.* (1997), o estudo de simulação da secagem de grãos sob condições externas constantes, para um certo tempo de processamento, pode ser dividido em dois grupos principais: modelos teóricos e empíricos. Segundo afirmações de Brooker *et al.* (1992), as relações empíricas têm-se mostrado as melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos.

Incropera & Dewitt (1992) relatam que os modelos empíricos geralmente têm como base a lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção. O primeiro deles, denominado modelo exponencial, resulta da simplificação da solução da equação de difusão para uma esfera. Lewis, citado por Jayas *et al.* (1991), assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade médio e o conteúdo de umidade de equilíbrio do produto, em um determinado período de tempo, expressa o modelo da seguinte maneira:

$$\frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \exp(-kt)$$

em que:

U = teor de umidade do produto, base seca;

U_e = teor de umidade de equilíbrio do produto, base seca;

k = constante de secagem, s⁻¹;

t = tempo, s.

Integrando a equação 1, obtém-se a seguinte relação para representar a razão de umidade do produto:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} \exp(-kt)$$

em que:

RU = razão de umidade, adimensional;

U₀ = teor de umidade inicial do produto, base seca.

Uma modificação empírica desenvolvida por Page, citado por Brooker *et al.* (1992), sobre o modelo exponencial, para representar a secagem de uma camada delgada de material, permite obter uma equação mais precisa para descrever as mudanças de razão de umidade durante o processo de secagem de produtos agrícolas. O acréscimo de um coeficiente (n) ao parâmetro tempo de secagem (t) da equação 2, representa o modelo proposto pelo autor: em que:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_o - U_e} \exp -kt^n$$

n = constante de secagem, adimensional.

As constantes de secagem, dependentes da natureza do produto, foram investigadas por diversos pesquisadores, os quais estabeleceram que essas podem ser descritas como função da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem (Li & Morey, 1984; Bala & Woods, 1992; Afonso Júnior & Corrêa, 1999).

Thompson *et al.* (1968), baseados em resultados experimentais, propuseram outro modelo empírico para representar a relação entre a razão de umidade e o tempo de secagem, expresso pela equação:

$$t = a \ln RU + b \ln RU^2 + RU \exp \frac{a \sqrt{a^2 + 4bt}}{2b}$$

em que os parâmetros a e b podem ser representados como funções da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem.

Em vista do exposto, e diante da escassez de informações na literatura especializada a respeito da cinética de secagem de sementes de milho doce em camada delgada, desenvolveu-se este trabalho, com o objetivo de determinar as curvas de secagem do produto e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais, para duas cultivares de milho doce, em função da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado no laboratório de pré-processamento e armazenagem de produtos agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa.

Foram utilizadas sementes de milho doce (*Zea mays* L.) das cultivares BR 400 (Superdoce) e BR 402 (Doce Cristal), colhidas e debulhadas manualmente, sendo submetidas, em seguida, a uma pré-limpeza em máquina de ventilador e peneira e em separador pneumático. Depois de submetido a pré-secagem à sombra, apresentando teor de umidade médio de 17,7% base úmida, o produto foi acondicionado em sacos de polietileno, em câmara fria, à temperatura de $5 \pm 2^\circ\text{C}$.

As amostras, antes das operações de secagem, foram retiradas da câmara fria e deixadas expostas à temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas, visando atingir o equilíbrio térmico. Os teores de umidade do produto foram determinados pelo método da estufa, $105^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, durante 24h, em duas repetições por amostra (Brasil, 1992).

Os tratamentos de secagem, para cada cultivar estudada, foram dispostos em esquema fatorial 4×4 , com quatro níveis de temperatura (30, 40, 50 e 60°C) e quatro níveis de umidade relativa do ar de secagem (0,30; 0,40; 0,50 e 0,60), em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições de 2.000g para cada tratamento.

Todos os tratamentos de secagem foram realizados utilizando-se unidade condicionadora de ar do tipo “Aminco-Aire” (Figura 1), dotada de dispositivos para o controle da temperatura e umidade relativa do ar fornecido, composta por seis bandejas removíveis com fundo telado, para permitir a passagem do ar por entre a massa de produto.

O fluxo de ar foi determinado a partir da velocidade do ar fornecido pelo equipamento, com o auxílio de um anemômetro de lâminas rotativas, e

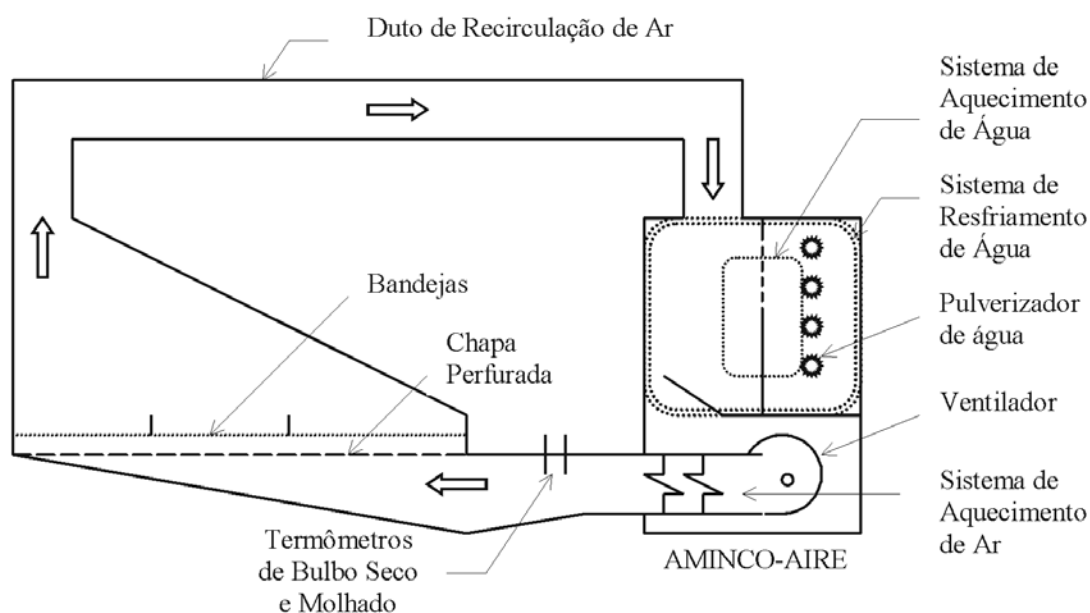


FIGURA 1. Desenho esquemático do equipamento experimental utilizado para secagem do produto.

mantido constante para todos os tratamentos em, aproximadamente, $26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

A temperatura e a umidade relativa da massa de ar foram determinadas e monitoradas utilizando-se um psicrômetro, instalado no interior da câmara próximo às bandejas contendo as amostras do produto. A umidade relativa do ar secante foi calculada por meio de um programa computacional desenvolvido a partir de equações psicrométricas (Grapsi).

Durante a operação de secagem, foram realizadas pesagens periódicas, até atingir o teor de umidade final de, aproximadamente, 12% b.u. Para a determinação das razões de umidade (RU), o teor de umidade de equilíbrio higroscópico foi calculado pela equação de Chun-Pfost, ajustada aos dados experimentais obtidos por Araujo *et al.* (2001), para as duas cultivares estudadas:

- Superdoce

$$U_e = \{26,877 - 4,777 \cdot \ln [-(T + 25,721) \cdot \ln (UR)]\} / 100$$

- Doce Cristal

$$U_e = \{25,459 - 4,568 \cdot \ln [-(T + 20,533) \cdot \ln (UR)]\} / 100$$

em que:

UR = Umidade relativa do ar de secagem, decimal;

T = temperatura do ar de secagem, °C.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, realizou-se análise de regressão não-linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa computacional Statistica 5.0. Estimaram-se os valores dos parâmetros dos modelos em função das variáveis independentes temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Para relacionar os parâmetros dos modelos estudados com as variáveis temperatura e umidade relativa, optou-se pelo modelo estatístico apresentado a seguir:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 T_i^2 + \beta_3 UR_j + \beta_4 UR_j^2 + \beta_5 (T \cdot UR)_{ij} + E_{ij}$$

em que:

Y_{ij} = valores observados dos parâmetros, para o modelo em estudo, na temperatura i e umidade relativa do ar j ;

β_0 = constante da regressão;

β_z = coeficientes da regressão, $z = 1, 2, 3, 4$, e 5 ;
 T_i = temperatura do ar de secagem, para os níveis
 30, 40, 50 e 60°C;
 UR_j = umidade relativa do ar de secagem, para os
 níveis 0,30; 0,40; 0,50 e 0,60;
 E_{ij} = erro aleatório.

O desvio médio relativo (P) e o desvio padrão estimado (SE), para cada modelo, foram calculados conforme descrito a seguir:

$$P = \frac{1}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y}$$

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

em que:

n = número de observações;

Y = valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$ = valor calculado pelo modelo;

GL = graus de liberdade do modelo.

O grau de ajuste do modelo aos dados experimentais baseou-se na magnitude do coeficiente de determinação ajustado, na magnitude do desvio médio relativo e do desvio padrão estimado e na verificação de falta de ajuste do modelo estatístico pela análise dos resíduos entre os valores experimentais e estimados.

Resultados e Discussão

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados os resumos dos modelos ajustados por meio de regressão não-linear aos dados experimentais de secagem de milho doce das cultivares Superdoce e Doce cristal, respectivamente.

TABELA 1. Parâmetros das equações ajustadas para se calcular a razão de umidade (RU) de sementes de milho doce em camada delgada, em função da temperatura (T) e da umidade relativa do ar de secagem (UR), com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio relativo (P) e desvio padrão estimado (SE), para a cultivar Superdoce.

Parâmetro	Coeficientes do Modelo						R^2	P	SE
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
Exponencial								0,081	0,451
k	-0,049	$0,734 \times 10^{-2} **$	$0,101 \times 10^{-3} *$	0,170 n.s.	-	-0,013*	0,992		
Page								0,018	0,073
k	-0,056	0,013*	-	0,196**	-	-	0,986		
0,012*									
n	0,828	-0,022*	$0,254 \times 10^{-3} *$	0,709 n.s.	-1,163**	0,013*	0,941		
Thompson								0,019	0,084
a	-3,394	0,134*	$-0,126 \times 10^{-2} *$	-3,829*	-	-	0,929		
b	20,697	-0,444*	$0,303 \times 10^{-2} *$	-18,854**	20,079**	-	0,968		

* significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t;

** significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t;

n.s. não significativo.

TABELA 2. Parâmetros das equações ajustadas para se calcular a razão de umidade (RU) de sementes de milho doce em camada delgada, em função da temperatura (T) e da umidade relativa do ar de secagem (UR), com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio relativo (P) e desvio padrão estimado (SE), para a cultivar Doce Cristal.

Parâmetro	Coeficientes do Modelo						R^2	P	SE
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
Exponencial								0,058	0,391
k	-0,139	0,010*	-	0,087 ^{n.s.}	-	$-0,746 \times 10^{-2}$ *	0,987		
Page								0,015	0,079
k	$-0,633 \times 10^{-3}$	$0,809 \times 10^{-2}$ *	-	0,142 ^{n.s.}	-	$-0,811 \times 10^{-2}$ *	0,974		
n	0,982	-0,022*	$0,245 \times 10^{-3}$ *	-0,369 ^{n.s.}	-	0,017*	0,954		
Thompson								0,012	0,059
a	-2,226	0,114**	$-0,119 \times 10^{-2}$ **	-6,280*	-	-	0,904		
b	45,766	-1,034*	$0,746 \times 10^{-2}$ *	-34,958*	31,594**	-	0,983		

* significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t;

** significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t;

^{n.s.} não significativo.

Observa-se, na Tabela 1, que as equações com base nos modelos de Page e Thompson foram as que melhor se ajustaram aos dados experimentais de secagem das sementes da cultivar Superdoce, com elevados coeficientes de determinação ajustados e baixos valores para os desvios médios relativo e estimado; no entanto, verifica-se, nessa tabela, que os valores desses coeficientes são praticamente coincidentes, sendo ligeiramente melhores os encontrados para o modelo de Page.

Da mesma forma, a análise dos resultados apresentados na Tabela 2 indica que os modelos de Page e Thompson também se mostraram adequados para fornecer estimativas satisfatórias para a razão de umidade das sementes de milho doce da cultivar Doce Cristal, quando comparados com os valores obtidos para o modelo exponencial. Entretanto, para este caso, o modelo de Thompson foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem, com resultados ligeiramente superiores aos obtidos pelo modelo de Page.

Dessa forma, verifica-se que as curvas de secagem para as sementes de milho doce, independentemente da cultivar analisada, podem ser adequadamente representadas pelos modelos cinéticos de Page e Thompson, com seus parâmetros de secagem, expressos por equações não lineares, ajustados em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Esses resultados encontram-se de acordo com os obtidos por diversos autores, para diferentes produtos agrícolas (Bala & Woods, 1992; Afonso Júnior & Corrêa, 1999; Guedes & Faria, 2000).

Os resíduos, baseados na diferença entre os valores experimentais e estimados para cada cultivar e modelo matemático ajustado, são apresentados na Figura 2. Verifica-se, nessa figura, que os valores residuais para os modelos de Page e Thompson apresentaram comportamento aleatório, indicando serem esses modelos adequados para descrição das curvas de secagem das sementes de milho doce, cultivar Superdoce, e o ambiente que

os envolve. No entanto, para o modelo exponencial, observa-se uma distribuição tendenciosa dos resíduos, sugerindo que essa equação representa de forma menos satisfatória o fenômeno estudado para essa cultivar. Ainda na Figura 2, observa-se, para

as sementes de milho doce da cultivar Doce Cristal, que os modelos de Page e Thompson também apresentaram comportamento aleatório dos valores residuais, em função dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico estimados. O modelo exponencial

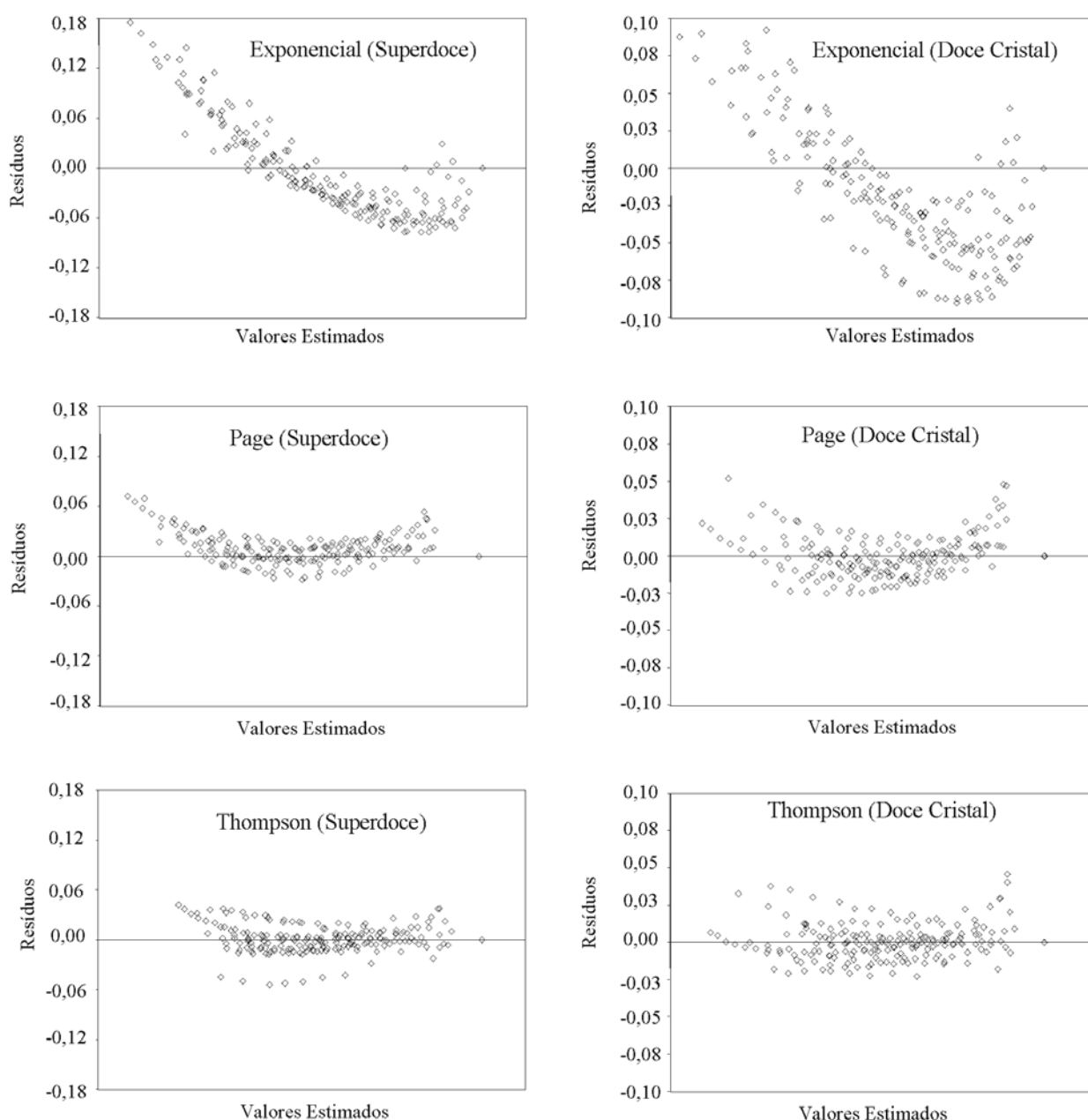


FIGURA 2. Distribuição dos resíduos para as cultivares de milho doce e modelos matemáticos analisados, em função dos valores estimados.

mostrou-se tendencioso, apresentado um comportamento acentuado de dispersão dos valores residuais, quando comparado com os resultados obtidos para os outros modelos analisados.

Na Figura 3 são apresentados gráficos comparando os valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo que melhor representou o comportamento higroscópico da cultivar Superdoce, em função do tempo, temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Verifica-se, nessa figura, o ajuste adequado da equação de Page e a pequena tendência de dispersão dos valores estimados em relação aos dados experimentais dessa cultivar.

De maneira semelhante, observa-se, na Figura 4, que o modelo de Thompson apresentou pequeno desvio entre os valores experimentais e

estimados de sementes de milho doce da cultivar Doce Cristal, representando satisfatoriamente o processo de secagem desse produto.

Conclusões

As curvas de razão de umidade das sementes de milho doce, de ambas as cultivares analisadas, podem ser adequadamente descritas pelos modelos de Thompson e Page, com seus parâmetros ajustados em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem;

O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem de milho doce, cultivar Superdoce, enquanto o modelo de Thompson foi o que melhor representou esse processo para as sementes da cultivar Doce Cristal.

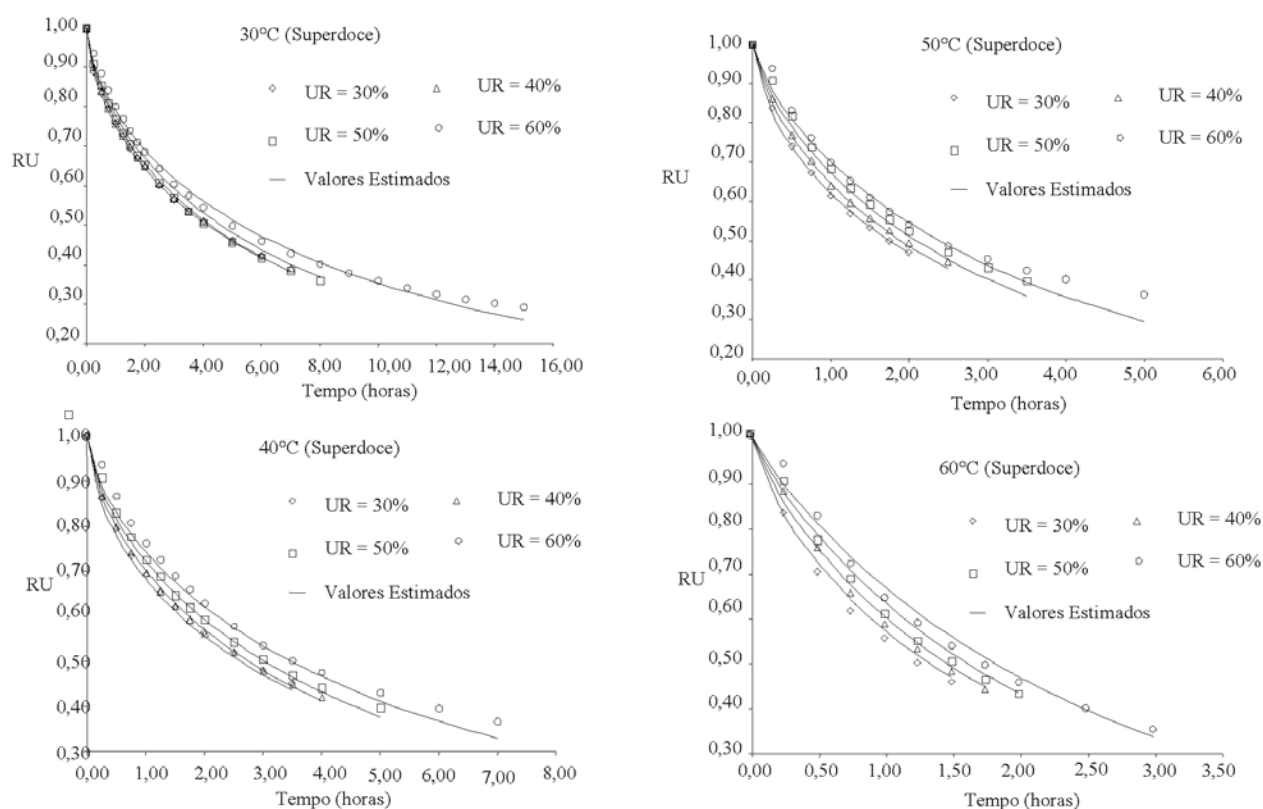


FIGURA 3. Valores experimentais e estimados de razão de umidade para sementes de milho doce, cultivar Superdoce, utilizando-se o modelo de Page.

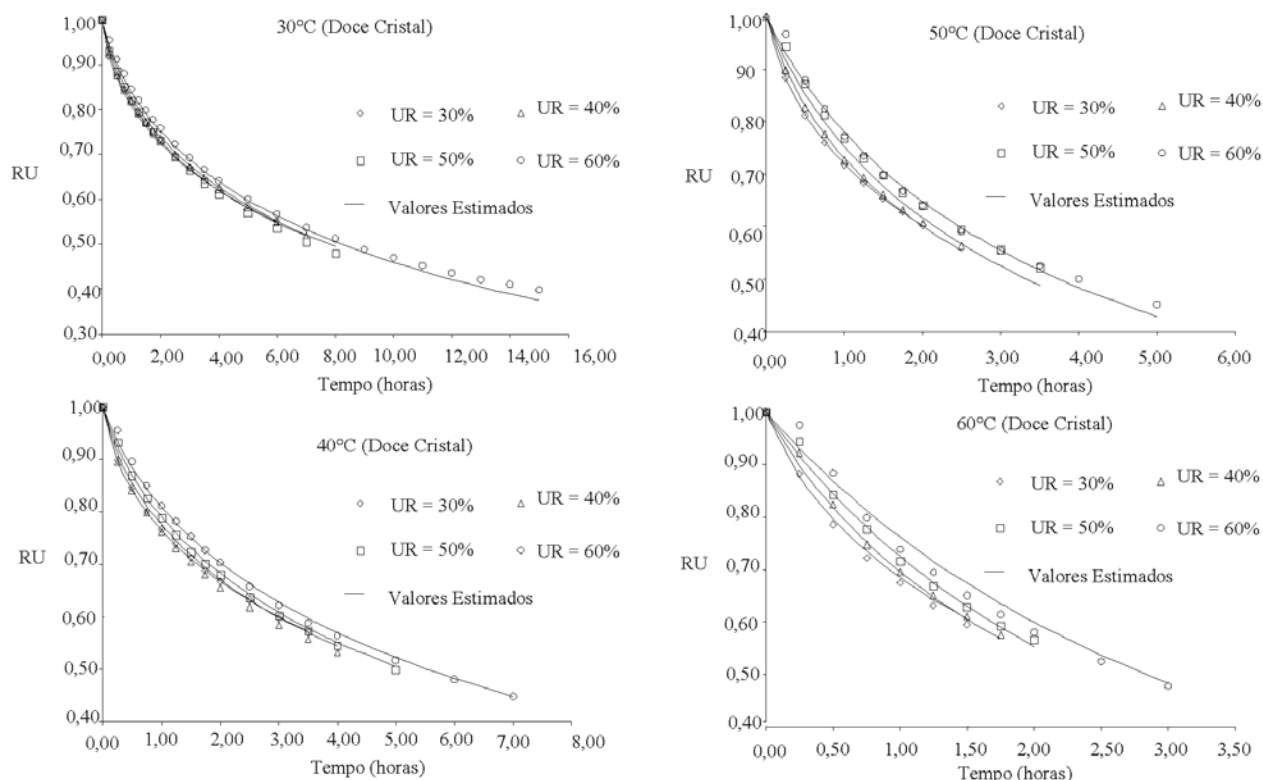


FIGURA 4. Valores experimentais e estimados de razão de umidade para sementes de milho doce, cultivar Doce Cristal, utilizando-se o modelo de Thompson.

Literatura Citada

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

ARAUJO, E.F.; CORRÊA, P.C.; SILVA, R.F. Comparação de modelos matemáticos para descrição das curvas de desorção de sementes de milho-doce. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.7, p.991-995, 2001.

BALA, B.K.; WOODS, J.L. Thin layer drying models for malt. **Journal of Food Engineering**, London, v.16, n.3, p.239-249, 1992.

BEKER, J.; MUJUMDAR, A.S.; GIROUX, M. Some fundamental attributes of corn and potato drying in microwave fields. **Drying Technology**, New York, v.15, n.2, p.539-554, 1997.

BERGER, R.D.; WOLF, E.A. Control of seedborne and soilborne mycoses of "Florida Sweet" corn by seed treatment. **Plant Disease**, St. Paul, v.58, n.8, p.922-923, 1974.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: DNDV/CLAV, 1992. 365p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.

GUEDES, A.M.M.; FARIA, L.J.G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.)

em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.2, n.1, p.73-86, 2000.

HALFON-MEIRI, A.; SOLEL, Z. Factors affecting seedling blight of sweet corn caused by seedborne *Penicillium oxalicum*. **Plant Disease Reporter**, St. Paul, v.74, n.1, p.36-39, 1990.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992. 380p.

JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S.; PABIS, S.; MUIR, W. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, New York, v.9, n.3, p.551-588, 1991.

LI, H.; MOREY, R.U. Thin-layer drying of yellow dent corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.27, n.2, p.581-585, 1984.

PESSOA, H.B.S.V. Produção de sementes genéticas de milho doce (*Zea mays* var. *sacharata* L.): um exemplo com a cultivar superdoce. **Informativo ABRATES**, Brasília, v.6, n.1, p.62-72, 1996.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

WANN, E.V. Seed vigor and respiration of maize kernels with different endosperm genotypes. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v.105, n.1, p.31-34, 1980.

WILSON JR., D.O.; TRAWATHA, S.E. Physiological maturity and vigor in production of “Florida Staysweet” shrunken-2 sweet corn. **Crop Science**, Madison, v.31, p.1640-1647, 1991.