

SECAGEM SOLAR DE GRÃOS RESIDUAIS E FARINHA DE GRÃOS RESIDUAIS DE URUCUM

SOLAR DRYING OF ANNATTO GRAINS AND WASTE GRAINS FLOUR OF ANNATTO

Dyego da Costa SANTOS¹; Alexandre José de Melo QUEIROZ²;

Rossana Maria Feitosa de FIGUEIRÊDO²; Emanuel Neto Alves de OLIVEIRA¹

1. Doutorandos em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. dyego.csantos@gmail.com; 2. Professores, Doutores, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.

RESUMO: O subproduto constituído pelos grãos residuais de urucum é resultante do processo de extração da bixina, principalmente na indústria alimentícia, utilizando-se como meio extrator óleo vegetal. Atualmente, a maioria desses grãos vem sendo descartada, no entanto vê-se a possibilidade de incorporá-los na dieta humana, uma vez que, como todos os grãos, são ricos em carboidratos, proteínas e fibras alimentares. Neste trabalho objetivou-se secar, em um secador solar, grãos residuais e farinha de grãos residuais de urucum, com e sem a camada de óleo proveniente do processo de extração industrial da bixina, ajustar diferentes modelos matemáticos as curvas de secagem e determinar a difusividade efetiva das amostras. Durante as secagens solares foi verificado, no interior do secador, temperaturas médias superiores a 50 °C. Observou-se que as amostras de grãos residuais de urucum com e sem a camada de óleo demoram um maior intervalo de tempo para atingirem o teor de água de aproximadamente 5% b.u., enquanto que as amostras de farinhas de grãos residuais de urucum com e sem óleo tiveram as maiores taxas de secagens. Todos os modelos matemáticos avaliados representaram de forma satisfatória a cinética de secagem das amostras testadas, com valores de R^2 superiores a 0,96 e valores de DQM inferiores a 1,0, sendo que o modelo de Midilli foi o que apresentou os melhores parâmetros de ajustes. A difusividade efetiva apresentou-se na ordem de $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para todas as amostras estudadas, sendo que o maior valor foi encontrado para a amostra de grão sem óleo ($6,47 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e o menor para a farinha sem óleo ($0,69 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

PALAVRAS-CHAVE: *Bixa orellana* L. Resíduo agroindustrial. Secador solar.

INTRODUÇÃO

O urucuzeiro (*Bixa orellana* L.) é uma espécie semiarbórea perene, pertencente à família Bixaceae, originário da América tropical, incluindo a Amazônia brasileira. Atualmente é cultivado em várias regiões do País, onde é popularmente conhecido por urucum, urucu, uru-uva, urucu-bravo, orucu ou annatto. Os frutos dessa bixácea são abundantes, de coloração variando de amarela a vermelho-escuro, na forma de cápsulas ovoides, também conhecidas por cachopas, cobertas por longos espinhos flexíveis e apresentando, em média, 60-70 sementes no seu interior. As sementes possuem uma polpa pastosa com pigmentos de importância comercial, que são utilizados nas indústrias têxtil, farmacêutica, alimentícia e cosmética (KRUPPA et al., 2012). O baixo custo de produção e sua baixa toxicidade tornam esse pigmento muito atrativo e conveniente em substituição a muitos corantes sintéticos (SANTOS et al., 2013; AGNER et al., 2004).

O urucum tem suscitado interesse crescente por parte da comunidade científica internacional pelo fato de ser a única fonte natural do pigmento bixina (GUTIERREZ et al., 2011). Na indústria em

geral, a bixina é extraída utilizando-se óleo vegetal como meio extrator (SILVA et al., 2010). Neste método, o pigmento é obtido por abrasão do exocarpo submerso em óleo a 70 °C (SILVA et al., 2008). Após o processo agroindustrial de extração da bixina, há a formação de uma grande quantidade de subproduto constituído pelos grãos residuais de urucum. Estes apresentam forte coloração avermelhada e óleo vegetal aderido. De acordo com Silva et al. (2006), o processo de extração deste pigmento produz de 94 a 98% de sobras, que ao serem descartadas podem poluir o meio ambiente. Rêgo et al. (2010) ainda afirmam que aproximadamente 2.500 t de subproduto do urucum são obtidos no Brasil a cada ano, principalmente na região Nordeste. Deste montante, cerca de 97% do subproduto não são aproveitados.

Atualmente uma pequena parcela dos grãos residuais de urucum vem sendo utilizados na alimentação animal (SILVA et al., 2006; RÊGO et al., 2010), no entanto também se vê a possibilidade de incorporação desse subproduto na alimentação humana, uma vez que, como outros grãos, é fonte de carboidratos, proteínas e fibras alimentares. Este aproveitamento, além de seguir tendência mundial de aproveitamento de subprodutos agroindustriais

(DIÓGENES et al., 2013; SANTOS et al., 2012; JITTANIT, 2011), também evitaria problemas ambientais decorrentes do descarte indiscriminado desses resíduos. Antes de estudos específicos a cerca da incorporação dos grãos residuais de urucum na dieta humana, torna-se necessário pesquisar sua secagem.

Recentemente, os preços altos e a escassez de combustíveis fósseis têm aumentado a necessidade de utilização da energia solar como fonte de energia alternativa para a secagem de produtos agrícolas, especialmente nos países em desenvolvimento (TRIPATHY; KUMAR, 2009). A localização tropical da maior parte do território coloca o Brasil em posição privilegiada para a utilização de energia solar, especialmente por apresentar alguns períodos do ano com pouca nebulosidade, baixa umidade relativa do ar e elevada incidência de radiação solar.

Alguns agricultores brasileiros já realizam as secagens de seus grãos por exposição ao sol, no entanto, Tunde-Akintunde (2011) relatou que este tipo de secagem apresenta alguns problemas devido à riscos de contaminação e ataque de insetos, além de longos tempos de secagem requeridos. De modo a ultrapassar estas desvantagens, o processo de secagem por exposição ao sol pode ser substituído pela secagem com utilização de secadores solares. Segundo Chowdhury et al. (2011), a secagem com secador solar pode ser considerada como uma evolução da secagem por exposição ao sol, sendo, entretanto, um sistema mais eficaz para o aproveitamento da energia solar. Para se ter uma idéia, Akpinar (2008) reporta que a utilização de um secador solar permite redução do tempo de secagem em cerca de 65%, em relação a secagem por exposição ao sol.

Nesse contexto, os objetivos do estudo avaliar o processo de secagem de grãos residuais e farinhas de grãos residuais de urucum em um secador solar, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais e determinar a difusividade efetiva no processo de secagem das amostras.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados grãos residuais de urucum doados pela indústria alimentícia Maratá, com sede no Estado de Sergipe. Os grãos residuais de urucum apresentavam-se impregnados de óleo de soja e resquícios de pigmentos remanescentes do processo de extração da bixina.

A manipulação dos grãos para composição dos tratamentos foi realizada de dois modos: no

primeiro os grãos foram mantidos com a camada de óleo (amostras GCO) e no segundo a camada de óleo foi removida por meio de lavagens em água com detergente neutro (amostras GSO). Após a lavagem, os grãos foram distribuídos em camada fina em bancada de laboratório até a eliminação da água superficial. Parte das amostras GCO e GSO foi triturada em moinho de facas para composição de mais dois tratamentos: farinha de grãos com óleo (amostras FCO) e farinha de grãos sem óleo (amostras FSO). As amostras GCO e GSO apresentavam no início das secagens teor de água de aproximadamente 18% b.u. (21,95% b.s.), enquanto que as amostras FCO e FSO apresentavam teor de água de aproximadamente 20% b.u. (25% b.s.).

Os ensaios foram realizados com 4 repetições, sendo que em cada repetição foi utilizado aproximadamente 15 g de amostra. Na determinação das cinéticas de secagem, as amostras foram pesadas em cestas montadas em tela de arame com comprimento e largura de 10 cm e altura de 3 cm (amostras GCO e GSO) ou em recipientes de alumínio com diâmetro de 13,5 cm e altura de 1,5 cm (amostras FCO e FSO) e conduzidas à secagem em secador solar.

As secagens foram iniciadas aproximadamente às 08:00 h e os dados experimentais das cinéticas de secagem foram obtidos por pesagens das amostras em intervalos regulares de 15 e 30 min. Quando as amostras atingiam o teor de água final teórico (5% b.u.), era determinado o teor de água em estufa (AOAC, 2010). Durante o processo de secagem no secador solar, foram monitoradas as temperaturas do interior do secador e do ambiente com uso de termopar.

Nas secagens foi utilizado um secador solar construído segundo Queiroz et al. (2011), com chapa zincada, revestido internamente com poliestireno expandido pintado na cor preta, tendo por cobertura um vidro plano com 4,0 mm de espessura (Figura 1). O secador, com formato quadrado, mede 71,0 cm de lado e 9,0 cm de profundidade.

As razões de água (Eq. 1) foram calculadas a partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens e dos teores de água determinados no final das mesmas.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

em que:

RX – razão de água (adimensional);

X – teor de água;

X_i – teor de água inicial;

X_e – teor de água de equilíbrio.

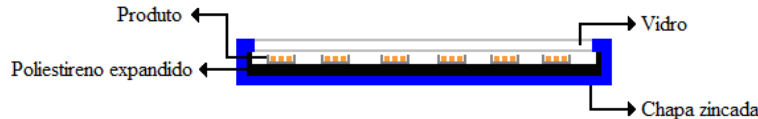


Figura 1. Secador solar utilizado nas secagens. **Fonte:** Adaptado de Queiroz et al. (2011).

Os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson (Tabela 1) foram ajustados aos dados experimentais

obtidos na cinética de secagem, utilizando-se o programa *Statistica 5.0* por meio de regressão não linear e método Quasi-Newton.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados no ajuste das curvas de secagem solar dos grãos residuais e das farinhas de grãos residuais de urucum.

Designação do Modelo matemático	Modelo
Aproximação da Difusão	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$ (2)
Dois Termos	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-q \cdot t)$ (3)
Midilli	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ (4)
Page	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$ (5)
Thompson	$RX = \exp((-a \cdot (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5}) / 2 \cdot b)$ (6)

t - tempo de secagem, min; k - constante de secagem, min^{-1} ; a, b, n, q - coeficiente dos modelos.

Na avaliação dos ajustes dos modelos aos dados experimentais foram utilizados como critérios o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM, Eq. 7):

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{\text{pred}} - RX_{\text{exp}})^2}{n}} \quad (7)$$

em que:

DQM – desvio quadrático médio;

RX_{pred} – razão de água predita pelo modelo;

RX_{exp} – razão de água experimental;

n – número de observações.

As taxas de secagem (Eq. 8) foram calculadas a partir dos dados de teor de água das amostras durante as secagens e dos tempos de secagem:

$$TX = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (8)$$

em que:

TX - taxa de secagem, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$;

X_{t+dt} - teor de água em t + dt, (kg de água/kg de matéria seca);

X_t - teor de água em um tempo específico;

t - tempo de secagem, min.

Para a determinação da difusividade efetiva, baseada na Teoria Difusional (Segunda Lei de Fick) ajustou-se os dados das secagens das amostras GCO e GSO ao modelo matemático da difusão líquida para a forma geométrica esférica, com aproximação de três termos (Eq. 9), considerando-se a

manutenção do raio da esfera equivalente inicial dos grãos ao longo da secagem:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{\text{ef}} t}{R_{\text{eq}}^2}\right] \quad (9)$$

em que:

RX - razão de água, adimensional;

D_{ef} - difusividade efetiva, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

n - número de termos;

R_{eq} - raio da esfera equivalente, m;

t - tempo, s.

No cálculo do raio da esfera equivalente das amostras GCO e GSO, primeiro se determinou o volume de 100 grãos (50 grãos com óleo e 50 grãos sem óleo) pelo método de deslocamento de massa (MOHSEIN, 1986), e o raio equivalente por meio do volume de uma esfera (Eq.10):

$$V_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (10)$$

em que:

V_g - volume do grão, m^3 ;

r - raio da esfera equivalente, m.

Para a determinação da difusividade efetiva das amostras FCO e FSO, ajustou-se os dados da secagem ao modelo matemático da difusão líquida para a forma de placa plana infinita, com aproximação por três termos (Eq. 11), considerando a distribuição do teor de água inicial uniforme e ausência de resistência térmica:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{ef}} \frac{t}{4L^2}\right] \quad (11)$$

em que:

RX - razão de água, adimensional;

D_{ef} - difusividade efetiva, $m^2 s^{-1}$;

n - número de termos;

L - dimensão característica (meia espessura da placa);

t - tempo, s.

Na análise estatística dos valores de difusividade efetiva, utilizou-se o programa *Assistat* com o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (4 tipos de amostras) e quatro repetições e a comparação de médias feita pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variações das temperaturas do ambiente e no interior do secador solar durante as secagens dos grãos residuais e das farinhas de grãos residuais de urucum são mostrados na Figura 2. Nota-se que durante as desidratações, a temperatura no interior do secador solar foi muito mais elevada do que a temperatura observada no ambiente externo. As temperaturas médias do ambiente foram de 27,18;

25,58; 25,07 e 24,50 °C, enquanto que as médias no interior do secador solar foram de 80,08; 55,04; 60,08 e 52,03 °C, para as secagens das amostras GCO, GSO, FCO e FSO, respectivamente. Percebe-se que temperatura mais elevada foi encontrada no interior do secador solar durante a secagem da amostra GCO. Isso pode estar relacionado às maiores temperaturas registradas para o ambiente durante o processo, além da elevada radiação solar no dia da secagem (2620,0 KJ m^2), que foi, aproximadamente, 35; 13 e 23% superior (INMET, 2011), quando comparada às radiações solares para as secagens das amostras GSO, FCO e FSO, respectivamente. Alguns pesquisados também verificaram temperaturas elevadas em secadores solares ao desidratarem produtos agrícolas: Çakmak e Yildiz (2011), estudando a secagem de uva sem semente, verificaram temperaturas superiores a 70 °C; Midilli e Kucuk (2003) reportaram temperaturas superiores a 80 °C ao desidratarem pistache; Sreekumar et al. (2008) encontraram temperaturas próximas a 100 °C na secagem de abóbora.

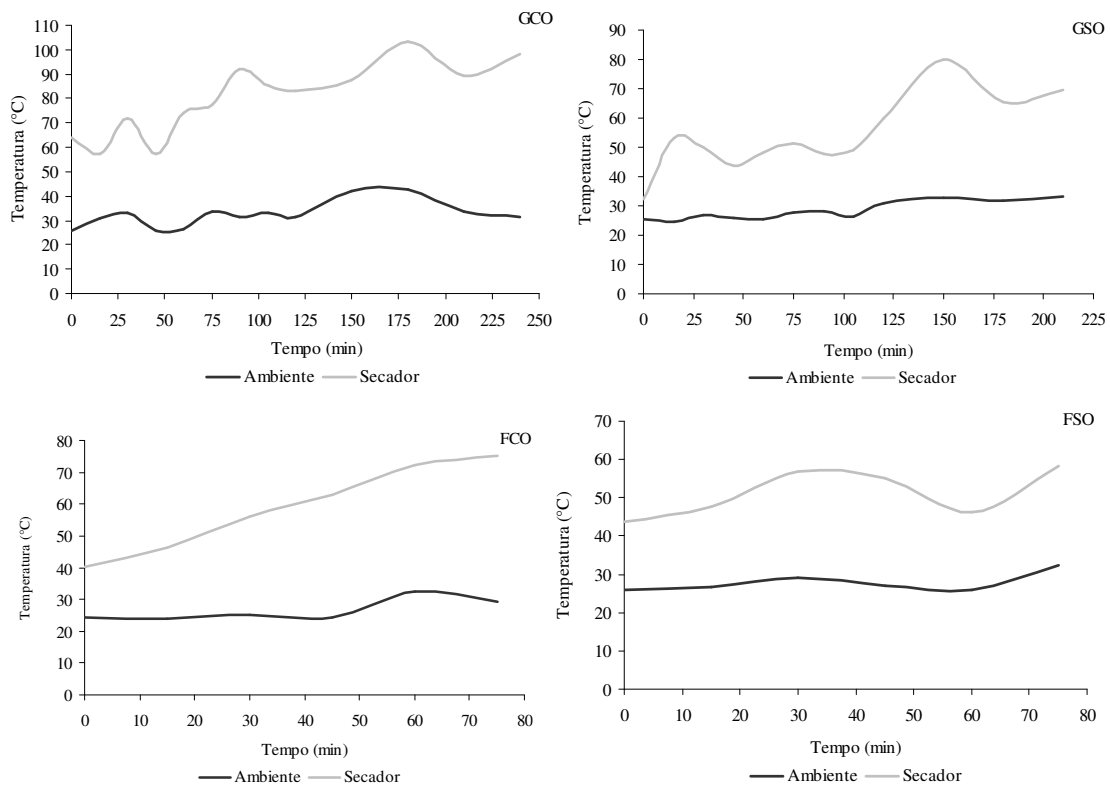


Figura 2. Variação da temperatura no interior do secador solar e no meio externo durante as secagens dos grãos residuais e das farinhas de grãos residuais de urucum.

Estão apresentadas na Figura 3 as cinéticas de secagem dos grãos residuais e das farinhas de grãos residuais de urucum em secador solar. Observa-se que o tipo de tratamento (grãos inteiros ou farinha) influenciou diretamente nos períodos de

secagem, em que, quanto maior foi o processamento menor foi o tempo necessário para se atingir o teor de água desejado. Os tempos para que as amostras atingissem o teor de água de aproximadamente 5% b.u. (5,26 b.s.) foi de 4 h (240 min) para a amostra

GCO, 3,5 h (210 min) para a amostra GSO e 1,25 h (75 min) para as amostras FCO e FSO. Os tempos de secagem das amostras GCO e GSO foram próximos aos encontrados por Tripathy e Kumar (2009) no estudo da secagem de batatas em cilindro (4,5 h) e fatias de batata ($\approx 3,5$ h) e por Ronoh et al.

(2009), na desidratação de sementes de amaranto (3,5 h). Tempos superiores de secagens em secadores solares foram reportados por Midilli & Kucuk (2003) para a secagem de pistache (6 h) e por Fagunwa et al. (2009) na secagem de mandioca (≈ 20 h).

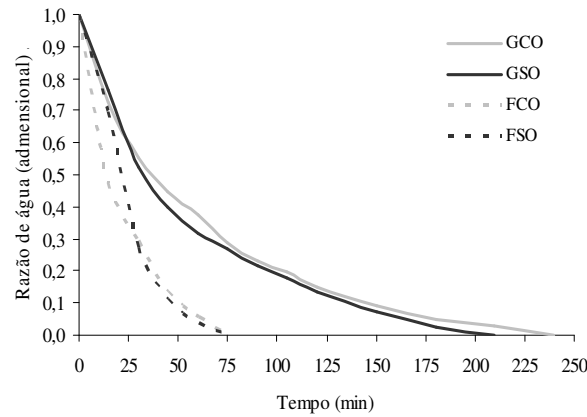


Figura 3. Curvas de secagem das amostras de grãos residuais e de farinhas de grãos residuais de urucum em secador solar.

São apresentados na Figura 4 os valores médios da taxa de secagem das diferentes amostras, observa-se que as maiores taxas de secagem foram verificadas no início das secagens, para todas as amostras avaliadas, sendo diminuídas com a continuidade do processo. Não existe qualquer período de taxa constante de secagem nestas curvas, uma vez que as secagens ocorrem em períodos de

queda de velocidade. Este fenômeno é comum e relatado na secagem de produtos agrícolas: amora (AKPINAR, 2008); pimenta verde (AKPINAR; BICER, 2008); grãos de café (RESENDE et al., 2009); folhas de hortelã e salsa (ZAKIPOUR; HAMIDI, 2011); uvas sem semente (ÇAKMAK; YILDIZ, 2011); grãos de feijão verde e quiabo (DOYMAZ, 2011); entre outros.

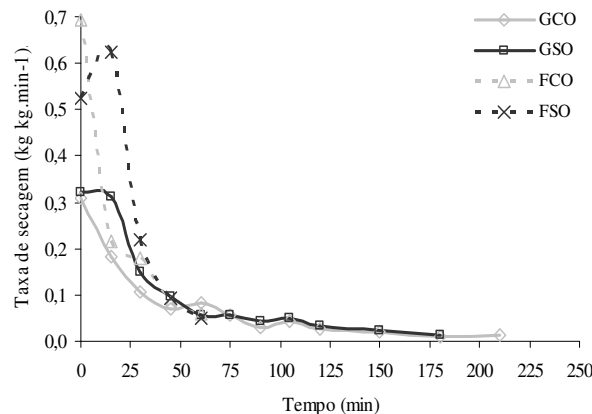


Figura 4. Taxas de secagem das amostras de grãos residuais e farinhas de grãos residuais de urucum em secador solar.

Os maiores valores de taxas de secagem foram revelados para as amostras FCO e FSO, com magnitudes superiores a $0,6 \text{ kg kg.min}^{-1}$. Nota-se ainda que com o prosseguimento da secagem, as taxas de remoção de água das amostras vão diminuindo. Esse comportamento já era esperado, uma vez que, segundo Doymaz (2011), no período de queda de velocidade, a superfície do material não

é mais saturada com água, logo a velocidade de secagem é controlada pela difusão da umidade do interior para a superfície da amostra. Resende et al. (2009) explicaram que no final da secagem a água se encontra fortemente ligada, necessitando de maior energia para a sua evaporação, assim a secagem das amostras ocorre mais lentamente, resultando em menores valores da taxa de secagem.

Quanto às amostras GCO e GSO, verificou-se taxas de secagem com magnitudes ligeiramente superiores a $0,3 \text{ kg kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. De acordo com os resultados, pode-se inferir que as amostras FCO e FSO e as amostras GCO e GSO, respectivamente, possuem características de secagem semelhantes.

A grande diferença verificada entre as taxas de secagem das amostras de grãos (GCO e GSO) e farinhas (FCO e FSO) deve-se, principalmente, às características das amostras, uma vez que a temperatura de secagem foi elevada para ambas as amostras. Como os grãos de urucum apresentavam-se triturados para obtenção da farinha, houve maior superfície de contato dessas amostras com o ar de secagem, o que favoreceu a remoção de água. Segundo El-Beltagy et al. (2007), a velocidade de secagem além de sofrer influência da temperatura, também pode ser influenciada pelas características da amostra, área da superfície do produto e condições de fluxo.

Verificam-se, na Tabela 2, os teores de água inicial e final das amostras GCO, GSO, FCO e FSO desidratadas em secador solar. Observa-se que ao final da secagem, todas as amostras tiveram que perder mais de 70% de água para que se atingisse os valores de teor de água próximos ao desejado (5,26% b.s.). Midilli & Kucuk (2003) desidrataram em camada fina pistache com casca em secador solar e também encontraram porcentagem de redução de água superior a 70%. Ronoh et al. (2009) secaram em camada fina sementes de amaranto em secador solar e obtiveram perda de 89,06% no conteúdo de água, superior, portanto, à perda das amostras de urucum. Já Gatea (2010) desenvolveu um secador solar e avaliou seu desempenho desidratando milho. Os autores obtiveram perda de 43,79% de água, estando inferior ao verificado para as amostra deste trabalho.

Tabela 2. Teores de água inicial e final das amostras de grãos residuais e farinhas de grãos residuais de urucum desidratadas em secador solar.

Amostra	Teor de água (% b.s.)		Perda de água (%)
	Inicial	Final	
GCO	20,50	5,16	74,83
GSO	23,27	4,85	79,16
FCO	23,47	4,99	78,74
FSO	27,16	4,51	83,39

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros dos ajustes dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem em secador solar das amostras GCO, FCO, GSO e FSO com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM). Pode-se verificar que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais das secagens de todas as amostras, apresentando valores de R^2 superiores a 0,99 e alguns dos menores DQM; no entanto, nota-se que todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram valores de R^2 superiores a 0,99 e valores de DQM inferiores a 1,0, com exceção do produto FSO que revelou valores de R^2 superiores a 0,96. Esses resultados mostram que todos os modelos avaliados podem ser utilizados na predição da cinética de secagem das amostras.

Akpınar e Bicer (2008) estudaram a secagem em camada fina de pimentão longo verde

em secador solar e verificaram que os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Page e Thompson sinalizaram valores de R^2 superiores a 0,96. Tunde-Akintunde (2011) e Ronoh et al. (2009) ajustaram o modelo de Page aos dados experimentais da secagem de pimenta malagueta e sementes de amaranto, respectivamente, e também constataram ajustes superiores a 0,99. Midilli & Kucuk (2003) obtiveram, na secagem de pistache com e sem casca, valores de R^2 superiores a 0,99 para o modelo de Page e 0,97 para o modelo de Dois Termos. Akpınar & Bicer (2007) também ajustaram os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem de cereja e verificaram que os modelos avaliados apresentaram ajustes superiores a 0,99, com exceção do modelo de Page, que apresentou valor de R^2 superior a 0,98.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos matemáticos com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das amostras de grãos residuais e de farinhas de grãos residuais de urucum em secador solar.

Modelo	Amostra	Parâmetros					R^2	DQM
		a	b	k	n	q		
Aproximação da Difusão	FCO	0,0697	0,0589	0,7264	-	-	0,9956	0,0128
	GCO	0,1244	0,1199	0,1237	-	-	0,9987	0,0079
	FSO	-0,9950	0,3370	0,1936	-	-	0,9997	0,0038
	GSO	0,2026	0,3210	0,0483	-	-	0,9950	0,0051
Dois Termos	FCO	0,4975	0,4975	0,0454	-	0,0454	0,9951	0,0083
	GCO	0,1247	0,8756	0,1239	-	0,0148	0,9987	0,080
	FSO	0,5885	0,4582	0,0410	-	0,0410	0,9668	0,0394
	GSO	0,7949	0,2136	0,0155	-	0,0497	0,9951	0,0078
Midilli	FCO	0,9997	-0,0015	0,0935	0,7342	-	0,9992	0,0001
	GCO	1,0001	-0,0002	0,0365	0,8058	-	0,9995	0,0000
	FSO	1,0033	0,0002	0,0041	1,6769	-	0,9985	0,0010
	GSO	1,0089	-0,0002	0,0330	0,8516	-	0,9954	0,0007
Page	FCO	-	-	0,0503	0,9706	-	0,9952	0,0117
	GCO	-	-	0,0286	0,8775	-	0,9977	0,0118
	FSO	-	-	0,0044	1,6476	-	0,9983	0,0078
	GSO	-	-	0,0265	0,9137	-	0,9944	0,0040
Thompson	FCO	-1742,84	8,9123	-	-	-	0,9951	0,0102
	GCO	-15,2792	0,5493	-	-	-	0,9960	0,0149
	FSO	-2855,68	10,6298	-	-	-	0,9637	0,0188
	GSO	-17,9732	0,6115	-	-	-	0,9943	0,0065

A Figura 5 compara os dados de razão de água (RX) experimentais com aqueles estimados pelo modelo de Midilli, para a secagem das diferentes amostras em secador solar. A predição utilizando o modelo de Midilli mostrou os dados experimentais próximos à reta que passa pela

origem, que teoricamente representa a igualdade entre os valores experimentais e estimados, evidenciando adequação do modelo na representação da secagem das amostras. Resultados similares foram observados por Darvishi et al. (2012) ao estudarem a secagem de fatias de cenoura.

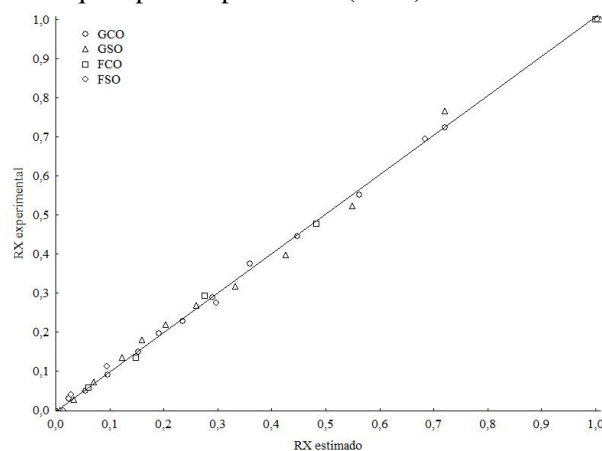


Figura 5. Relação entre os valores experimentais e estimados de razão de água pelo modelo de Midilli para a cinética de secagem de todas as amostras testadas em secador solar.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios da difusividade efetiva determinados para as secagens dos grãos residuais e das farinhas de grãos

residuais de urucum. Verifica-se que todos os valores de difusividade foram estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey.

Tabela 4. Valores médios de difusividade efetiva obtidos na secagem dos grãos residuais e das farinhas de grãos residuais de urucum em secador solar.

Amostra	Difusividade efetiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
GCO	$5,99 \times 10^{-11}$ b
GSO	$6,47 \times 10^{-11}$ a
FCO	$0,87 \times 10^{-11}$ c
FSO	$0,69 \times 10^{-11}$ d
Teste F	465351,03**

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey; ** Significativa a 1% de probabilidade pelo teste F.

Verifica-se que os valores de difusividade efetiva apresentaram-se com magnitudes na ordem de $10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, estando dentro da faixa reportada por Madamba et al. (1996) para secagem de produtos agrícolas (10^{-9} a $10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Pesquisadores também reportaram difusividade efetiva na ordem de $10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$: grãos de abóbora (JITTANIT et al., 2011); grãos de ervilha (DOYMAZ; KOCAYIGIT, 2011); grãos de canola (GAZOR; MOHSENIMANESH, 2010); entre outras.

Analisando as amostras GCO e GSO, nota-se que o produto com óleo (GCO) apresentou a menor difusão de água, devido, provavelmente, à presença do óleo vegetal que formou uma barreira física ao redor do grão, o que dificultou a remoção de água. Quanto às amostras FCO e FSO, observa-se que a amostra com óleo (FCO) revelou a maior difusividade efetiva, sendo o comportamento oposto ao das amostras GCO e GSO. Isso pode ser justificado analisando-se as temperaturas médias atingidas no interior do secador solar.

Na secagem da amostra FCO, constatou-se que a temperatura média foi quase 10°C superior em relação à secagem da amostra FSO. Fica evidente a influência da temperatura nos valores de difusividade das amostras FCO e FSO, em que a elevação desse parâmetro promoveu uma redução da resistência à difusão de água. Segundo Goneli et al. (2009), com aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida de resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam alterações na difusão da água nos interstícios das amostras, favorecendo a movimentação da água no produto.

Comparando-se os grãos inteiros (GCO e GSO) com as farinhas (FCO e FSO), observa-se que as primeiras amostras apresentaram as maiores difusividades, corroborando com o estudo de Martinazzo et al. (2007) que, estudando a

difusividade efetiva em folhas de capim-limão submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte, verificaram que as amostras com comprimento de 20 cm apresentaram difusividade superior às amostras com 30 cm, ou seja, o maior processamento das folhas não favoreceu o aumento da difusividade, fato também observado neste estudo. Todavia, deve-se salientar que esses resultados podem estar relacionados à grande variação de temperatura verificada no interior do secador solar.

CONCLUSÕES

A utilização do secador solar mostrou-se eficiente para secagem de grãos residuais e de farinhas de grãos residuais de urucum, com obtenção de baixos tempos de secagem.

Dentre os tratamentos, observou-se que a amostra de grãos residuais de urucum com óleo apresentou o maior tempo de desidratação (240 min), enquanto que as amostras de farinhas de urucum com e sem óleo apresentaram os menores tempos (75 min).

As maiores e menores taxas de secagem foram verificadas para as amostras de farinha de urucum com óleo e grãos de urucum com óleo, respectivamente.

Todos os modelos avaliados representaram satisfatoriamente a cinética de secagem das amostras, com valores de R^2 superiores a 0,96 e valores de DQM inferiores a 1,0, sendo que o modelo de Midilli foi o que apresentou os melhores parâmetros de ajustes.

A difusividade efetiva apresentou-se na ordem de $10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, para todas as amostras.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq, pelo auxílio financeiro, e à Indústria Maratá, pela doação dos grãos residuais de urucum.

ABSTRACT: The byproduct consisting of annatto grains is waste resulting from the extraction of bixin, especially in the food industry, using as extractant vegetable oil. Currently, most of these grains has been ruled out, however sees the possibility of incorporating them in the human diet, since, like all grains are rich in carbohydrates, protein and dietary fiber. The objective of this study was to dry annatto grains and waste grains flour of annatto, with and without the oil layer from the industrial process of extraction of bixin, in a solar dryer and fit different mathematical models of the drying and determine the diffusivity effective samples. During the solar drying was observed inside the dryer, average temperatures exceeding 50 °C. It was observed that samples of grain annatto with and without oil layer takes a longer time to achieve moisture content of approximately 5% wb, whereas the samples of waste grains flour of annatto with and without oil had the highest rates of drying. All mathematical models evaluated represent satisfactorily the drying kinetics of the samples tested, with R^2 values greater than 0.96 and DQM values below 1.0, and the Midilli model presented the best parameters adjustments. The effective diffusivity presented in the order of $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for all samples, while the highest value was found for the sample of grain without oil ($6.47 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and lowest for flour without oil ($0.69 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

KEYWORDS: *Bixa orellana* L. Agricultural residues. Solar dryer.

REFERÊNCIAS

- AGNER, A. R.; BARBISAN, L. F.; SCOLASTICI, C.; SALVADORI, D. M. F. Absence of carcinogenic and anticarcinogenic effects of annatto in the rat liver medium-term assay. **Food Chemical Toxicology**, Oxford, v. 42, n. 10, p. 687-1693, 2004.
- AKPINAR, E. K. Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Heidelberg, v. 22, n. 8, p. 1544-1553, 2008.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Modelling of thin layer drying kinetics of sour cherry in a solar dryer and under open sun. **Journal of Scientific & Industrial Research**, Bhopal, v. 66, n. 9, p. 764-771, 2007.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 49, n. 6, p. 1367-1375, 2008.
- AL-JUAMILY, K. E. J.; KHALIFA, A. J. N.; YASSEN, T. A. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. **Desalination**, Amsterdam, v. 209, n. 1/3, p. 163-170, 2007.
- AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis**. Washington: USA, 18th ed, 3th Review, 2010. 1094 p.
- CHOWDHURY, M. M. I.; BALA, B. K.; HAQUE, M. A. Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather. **Biosystems Engineering**, London, v. 110, n. 2, p. 222-229, 2011.
- ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. **Food and Bioproducts Processing**, London, v. 89, n. 2, p. 103-108, 2011.
- DARVISHI, H.; BANAKAR, A.; ZAREIN, M. Mathematical modeling and thin layer drying kinetics of carrot slices. **Global Journal of Science Frontier Research**, Massachusetts, v. 12, n. 7, p. 1-9, 2012.

- DIÓGENES, A. M. G.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, D. C. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.
- DOYMAZ, I. Drying of green bean and okra under solar energy. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, Beograd, v. 17, n. 2, p. 199-205, 2011.
- DOYMAZ, I.; KOCAYIGIT, F. Drying and rehydration behaviors of convection drying of green peas. **Drying Technology**, New York, v. 29, n. 11, p. 1273-1282, 2011.
- EL-BELTAGY, A.; GAMEA, G. R.; AMER ESSA, A. H. Solar drying characteristics of strawberry. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 78, n. 2, p. 456-464, 2007.
- GATEA, A. A. Design, construction and performance evaluation of solar maize dryer. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, Johannesburg, v. 2, n. 3, p. 39-46, 2010.
- GAZOR, H. R.; MOHSENIMANESH, A. Modelling the drying kinetics of canola in fluidised bed dryer. **Czech Journal of Food Sciences**, Praha, v. 28, n. 6, p. 531-537, 2010.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 64-73, 2009.
- GUTIERREZ, R. M. P.; BAEZ, E. G.; CORTEZ, M. S. L.; CÁRDENAS, S. A. Extracts of bixa inhibit glycation and AGEs formation *in vitro*. **Journal of Medicinal Plants Research**, Johannesburg, v. 5, n. 6, p. 942-948, 2011.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Consulta de dados da estação convencional de Campina Grande-PB**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 14 mar. 2011.
- JITTANIT, W. Kinetics and temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying. **Kasetsart Journal: Natural Science**, Bangkok, v. 45, n. 1, p. 147-158, 2011.
- KRUPPA, P. C.; FABRI, E. G.; RUSSOMANNO, O. M. R. Importância dos fungos presentes nas sementes de urucum. **O Biológico**, São Paulo, v. 74, n. 1, p. 51-54, 2012.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 68-72, 2007.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 44, n. 7, p. 1111-1122, 2003.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers. 1986. 841p.
- QUEIROZ, A. J. M.; DANTAS, H. J.; FIGUEIREDO, R. M. F.; MELO, K. S. Solar drying of jack fruit almonds. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1150-1161, 2011.
- RÊGO, A.C.; CÂNDIDO, M. J. D.; PEREIRA, E. S.; FEITOSA, J. V.; RÊGO, M. M. T. Degradação de silagens de capim-elefante contendo subproduto do urucum. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.41, n. 3, p. 482-489, 2010.

- 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**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.
- RONOH, E. K.; KANALI, C. L.; MAILUTHA, J. T.; SHITANDA, D. Modeling thin layer drying of amaranth seeds under open sun and natural convection solar tent dryer. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal**, Beijing, v. 11, n. 1, p. 1-13, 2009.
- SANTOS, D. C., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIRÊDO, R. M. F., OLIVEIRA, E. N. A. Drying of waste grains flour of annatto by using solar energy. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 7, n. 47, p. 6281-6288, 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.
- SILVA, J. H. V.; SILVA, E. L.; JORDÃO FILHO, J.; RIBEIRO, M. L. G.; COSTA, F. G. P. Resíduo da semente de urucum (*Bixa orellana* L.) como corante da gema, pele, bico e ovário de poedeiras avaliado por dois métodos analíticos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 5, p. 988-994, 2006.
- SILVA, G. F.; GAMARRA, F. M. C.; OLIVEIRA, A. L.; CABRAL, F. A. Extraction of bixin from annatto seeds using supercritical carbon dioxide. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 419-426, 2008.
- SILVA, P. I.; NACHTIGALL, A. M.; STRINGHETA, P. C. Eficiência de solventes na obtenção e caracterização de corantes de urucum (*Bixa orellana* L.). **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 28, n.1, p. 115-124, 2010.
- SREEKUMAR, A.; MANIKANTAN, P. E.; K. P. VIJAYAKUMAR, K. P. Performance of indirect solar cabinet dryer. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 49, n. 6, 1388-1395, 2008.
- TRIPATHY, P. P.; KUMAR, S. Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 29, n. 5/6, p. 884-891, 2009.
- TUNDE-AKINTUNDE, T. Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**, Oxford, v. 36, n. 8, p. 2139-2145, 2011.
- ZAKIPOUR, E.; HAMIDI, Z. Vacuum drying characteristics of some vegetables. **Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering**, Teerã, v. 30, n. 4, p. 97-105, 2011.