



## Cinética de secagem de sementes de crambe

Rute Q. de Faria<sup>1</sup>, Itamar R. Teixeira<sup>2</sup>, Ivano A. Devilla<sup>3</sup>,  
Diego P. R. Ascheri<sup>2</sup> & Osvaldo Resende<sup>4</sup>

### RESUMO

O estudo da cinética de secagem é de fundamental importância para a modelagem matemática, a qual tem sido muito usada no projeto e em análise dos processos de transferência de calor e de massa, durante a secagem. Buscou-se, então, avaliar a capacidade de ajuste de nove modelos matemáticos comumente utilizados para descrever o processo de secagem em sementes de crambe (*Crambe abyssinica* Horts), através de um delineamento inteiramente casualizado com três repetições, em que os tratamentos são constituídos de cinco teores de água (0,11; 0,13; 0,17; 0,25 e 0,28 decimal b.s) e cinco temperaturas do ar de secagem (30; 40; 50; 60 e 70 °C). Para verificação do ajuste dos modelos estudados fez-se análise de regressão não-linear, pelo método Quasi-Newton. De acordo com os dados obtidos concluiu-se que: o modelo da Aproximação por Difusão é o que melhor se ajusta aos dados de secagem obtidos; o aumento da temperatura de secagem promove maior taxa de remoção da água do produto; o coeficiente de difusão apresenta valores da ordem de  $0,18 \times 10^{-10}$  e  $3,92 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e a energia de ativação para a difusão líquida foi da ordem de  $4,97 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

**Palavras-chave:** secagem, modelagem, difusão, *Crambe abyssinica* Horts

## Drying kinetics of crambe seeds

### ABSTRACT

Drying kinetics is fundamental for mathematical and modeling widely used in the project and in the analysis of heat and mass transfer during drying. In this study it was sought to assess the capability of adjustment of nine mathematical models commonly used to describe the seed drying process of *Crambe abyssinica* Horts. The experimental design was completely randomized, with three replications. The treatments were five water contents (0.11; 0.13; 0.17; 0.25 and 0.28 decimal dry weight) and five drying temperatures (30; 40; 50; 60 and 70 °C). To determine the adjustment of the studied models a non linear regression analyses was performed according to Quasi-Newton method. According to the data obtained it was concluded that: the diffusion approximation method was the model that best adjusted to the drying data obtained; increases in drying temperature promoted higher rate of moisture removal from the seeds; the diffusion coefficient showed values of  $0.19 \times 10^{-10}$  and  $3.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ; the activation energy for liquid diffusion during drying of *Crambe abyssinica* Horts was about  $4.97 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

**Key words:** drying, modeling, difusion, *Crambe abyssinica* Horts

<sup>1</sup> UEG/UnUipameri, GO 330, Km 241, Anel Viário, S/N, CEP 75780-000, Ipameri, GO. Fone: (64) 3491-1556. E-mail: rute\_abu@yahoo.com.br

<sup>2</sup> CPGEA/UEG, BR 153, 3.105, Fazenda Barreiro do Meio, CP 459, Anápolis, GO. Fone: (62) 3328-1156. E-mail: itamar.teixeira@ueg.br; ascheridpr@gmail.com

<sup>3</sup> FAV/UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF. Fone: (61) 3107-6628. E-mail: devilla@unb.br

<sup>4</sup> IFT-Goiano. Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, CEP 75901-970, Rio Verde, GO. Fone: (64) 3620-5600. E-mail: osvresende@yahoo.com.br

## INTRODUÇÃO

O crambe (*Crambe abyssinica* Hortsh Ex. R. T), planta da família *Brassicaceae*, de origem mediterrânea, caracteriza-se por ser um vegetal arbustivo, de ciclo curto, uma vez que floresce em 35 dias e pode ser colhido em 90 dias, em virtude de se adaptar a condições climáticas diferenciadas, desde geadas típicas do sul do País até climas quentes e secos do cerrado brasileiro, em razão do baixo custo de cultivo e porque a maturidade uniforme possibilita a realização de colheita mecanizada (Falasca et al., 2010).

A semente de crambe é do tipo cariopse, contendo quantidade significativa de óleo na proporção de 44,1% na massa seca (Souza et al., 2009) superior, portanto, à da soja, que chega ao máximo de 24%. O óleo de sementes de crambe contém 55-60% de ácido erúxico, que faz o óleo não-comestível (Li et al., 2011), podendo ser usado como matéria-prima para a produção de biocombustíveis ocorrendo, recentemente, relatos de cultivo comercial em pequena escala em estados do centro-oeste, como Mato Grosso do Sul, com bom potencial de rendimento - 2000 kg ha<sup>-1</sup> (Pitol, 2008).

O estudo do processo de secagem fornece informações relativas ao comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem, normalmente ar atmosférico, aquecido ou não; essas informações são fundamentais para o projeto, operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (Corrêa et al., 2003).

Três são os tipos de modelo de secagem em camada delgada, usados para descrever a cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas, ou seja: o modelo teórico, que considera apenas a resistência interna à transferência de calor e água entre o produto e o ar quente; os modelos semiteóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (Midilli et al., 2002; Panchariya et al., 2002).

A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade e despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, devido à dificuldade de se quantificar esses múltiplos efeitos na massa do produto, e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados. Portanto, quando a difusão líquida é utilizada para produtos biológicos, referidas condições são normalmente consideradas satisfatórias (Afonso Junior, 2001).

Diversos autores estudaram o coeficiente de difusão por meio da modelagem e simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, porém os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos mas também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de matéria, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção (Zogzas et al., 1996).

O estudo e a modelagem matemática da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Na literatura, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de

secagem em camada fina para produtos agrícolas: pimenta cumari (Reis et al., 2011), frutos de lichia (Janjai et al., 2010), frutos de cereja (Mabellini et al., 2010), sementes de abóbora (Sacilik, 2007), folhas de capim limão (Martinazzo et al., 2007), sementes de amaranto (Abalone et al., 2006), grãos de trigo parboilizados (Mohapatra & Rao, 2005), além de sementes de feijão (Afonso Júnior & Corrêa, 1999), dentre outros.

No caso específico do crambe, só agora a espécie começou a despertar interesse da pesquisa em condições tropicais, com ênfase nas características agrônômicas (Toebe et al., 2010; Pitol, 2008), custo energético de implantação (Jasper et al., 2010) e qualidade de semente (Ruas et al., 2010; Masetto et al., 2009). Contudo, ainda são raros e pouco conclusivos os estudos investigativos sobre os procedimentos de secagem de suas sementes (Costa et al., 2011).

Objetivou-se, com este trabalho, estudar a cinética de secagem em camada fina das sementes de crambe submetidas a diversas condições de secagem investigando-se, também, o coeficiente de difusão e da energia de ativação, em condições experimentais.

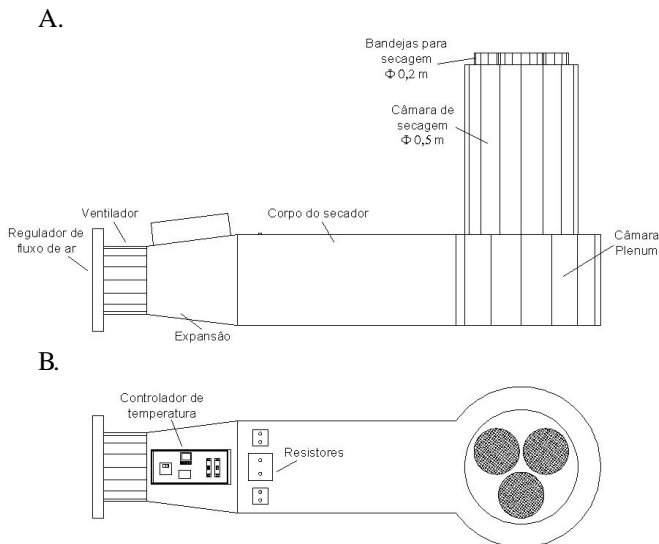
## MATERIAL E MÉTODOS

As sementes de crambe variedade BRS - Brilhante foram cultivadas no Sudoeste Goiano, no período de abril a junho do ano de 2009. A colheita foi realizada manualmente, apresentando teor de água em torno de 28% (b.s); em seguida, as sementes foram homogeneizadas e colocadas em sacos de polipropileno de baixa densidade, permanecendo acondicionadas em freezer até o momento da secagem, em temperatura em torno de 4 °C.

A fim de se obter amostras com diferentes teores de água, uma parte das sementes foi colocada em uma bandeja plástica, sem cobertura, para que perdessem água naturalmente. Este processo foi realizado em condições ambiente, sem ventilação forçada, sendo os valores médios de temperatura e umidade relativa equivalentes a aproximadamente 27 °C e 70%, respectivamente. As sementes foram divididas em cinco amostras, de 300 g; cada amostra permaneceu neste processo durante um período de tempo diferenciado e, ao término do procedimento, cada amostra foi acondicionada em embalagem de polietileno e novamente colocada dentro do freezer; antes, porém, 15 g de cada amostra foram separados para análise do teor de água determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 h, em três repetições (Brasil, 2009).

Empregou-se o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, em que os tratamentos foram constituídos de cinco teores de água (0,11; 0,13; 0,17; 0,25 e 0,28 decimal b.s) e cinco temperaturas do ar de secagem (30; 40; 50; 60 e 70 °C).

O processo de secagem foi realizado por meio de um secador de leito fixo, horizontal, com ventilação de ar forçada (Figura 1). Antes de cada experimento de secagem as amostras eram retiradas do freezer e mantidas em temperatura ambiente, por pelo menos 40 min, para que entrassem em equilíbrio com o ambiente, após o que as sementes foram espalhadas sobre três bandejas removíveis, de fundo telado contendo cada uma, inicialmente, em torno de 15 g de sementes de crambe.



**Figura 1.** Secador experimental de leito fixo utilizado na secagem das sementes de crambe: vista lateral (A) e vista superior (B)

Em todos os testes a redução do teor de água das sementes foi monitorada por gravimetria, pesando-se o conjunto bandeja-amostra em intervalos regulares. Durante o processo de secagem as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, em balança analítica, com resolução de 0,01 g. As pesagens foram conduzidas até que as sementes atingissem o equilíbrio higroscópico com as condições do ar de secagem, ou seja, quando a variação de massa fosse constante na segunda casa decimal por três pesagens consecutivas.

A velocidade do ar foi controlada e mantida constante em torno de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , com auxílio de um termo anemômetro digital da marca Minipa, modelo MDA - II. A temperatura foi monitorada por meio de um termopar localizado na saída do ar de secagem e a umidade relativa do ar ambiente foi medida por um psicrômetro.

Aos dados experimentais da secagem de sementes de crambe foram ajustadas nove equações empíricas e semiempíricas, frequentemente utilizadas para representação da secagem de produtos agrícolas (Goneli, 2008; Corrêa et al., 2007), e que estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas

Designação do modelo	Modelo	Designação
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(1)
Midilli	$RU = a \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(2)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k \cdot t)$	(3)
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \exp(-k \cdot t) + b \exp(-k_0 \cdot t) + \exp(-k_1 \cdot t)$	(4)
Aproximação por Difusão	$RU = a \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(5)
Dois Termos	$RU = a \exp(-k_0 \cdot t) + b \exp(-k_1 \cdot t)$	(6)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(7)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k \cdot t) + c$	(8)
Thompson	$RU = \exp(( -a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5}) / 2 \cdot b)$	(9)
Newton	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(10)
Verma	$RU = a \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	(11)
Wang e Sing	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(12)

em que:

RU - razão de umidade do produto, adimensional

$k, k_0, k_1$  - constantes de secagem,  $h^{-1}$

a, b, c, n - coeficientes dos modelos

t - tempo de secagem, h

Visando à determinação da razão de umidade das sementes de crambe para as diferentes condições de secagem, utilizou-se a Eq. 13:

$$RU = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (13)$$

em que:

X - teor de água do produto, decimal (b.s)

$X_e$  - teor de água de equilíbrio do produto, decimal (b.s)

$X_i$  - teor de água inicial do produto, decimal (b.s)

Utilizou-se o programa computacional Statistica versão 7.0®, para ajuste dos modelos (Tabela 1). Análises de regressão não-linear foram feitas pelo método Quasi-Newton e o grau de ajuste de cada modelo considerou a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a magnitude do erro médio relativo (P) e do desvio-padrão da estimativa (SE).

O erro médio relativo (P) e o desvio-padrão da estimativa (SE) para cada um dos modelos foram calculados através das Eqs. 14 e 15, respectivamente (Goneli, 2008):

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (14)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\left( \sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2 \right)}{GLM}} \quad (15)$$

em que:

Y - valor observado experimentalmente

$\hat{Y}$  - valor estimado pelo modelo

N - número de observações experimentais

GLM - graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo)

Para a determinação do coeficiente de difusão efetivo, fez-se o ajuste dos dados experimentais da secagem do crambe ao modelo matemático da difusão líquida para a forma geométrica esférica (Eq. 16). A solução analítica dessa equação se apresenta na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento, define a precisão dos resultados.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R_{eq}^2}\right] \quad (16)$$

em que:

$D_{ef}$  - coeficiente de difusão efetivo,  $m^2 s^{-1}$

- $R_{eq}$  - raio equivalente, m  
 $N$  - número de termos  
 $t$  - tempo de secagem, s

Esta equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, desconsiderando-se a contração volumétrica dos grãos e a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do grão (Brooker et al., 1992)

Para o cálculo do raio equivalente utilizado no modelo da difusão líquida, fez-se a medição dos três eixos ortogonais da semente, quais sejam: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, 50 sementes escolhidas aleatoriamente, foram medidas. O raio equivalente é definido como o raio de uma esfera cujo volume é igual ao da semente. O volume de cada semente (V), considerada um elipsoide oblato, foi calculado com base nos diâmetros perpendiculares, segundo a Eq. 17, descrita por Mohsenin (1986), como:

$$V = \frac{\pi(a \cdot b \cdot c)}{6} \quad (17)$$

em que:

- a - maior eixo do grão (comprimento), mm  
 b - eixo médio do grão (largura), mm  
 c - menor eixo do grão (espessura), mm

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a relação de Arrhenius (Eq. 18).

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (18)$$

em que:

- $D_0$  - fator pré-exponencial,  $m^2 s^{-1}$   
 $E$  - energia de ativação,  $J mol^{-1}$   
 $R$  - constante universal dos gases,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$   
 $T$  - temperatura absoluta, K

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de teor de água de equilíbrio ( $U_{eq}$ ), obtidos para cada temperatura aplicada, foram de 8,8; 6,4; 4,3; 2,1; e 1,2 % b.s. para as temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Desta forma, pode-se notar que a  $U_{eq}$  foi inversamente proporcional à temperatura de secagem, conforme o previsto e também já observado em outras sementes como, por exemplo, no cacau (Silva et al., 1979).

Para a maioria dos tratamentos os modelos matemáticos, ajustados aos dados experimentais, apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores ou próximos a 0,95 (Tabelas 2, 3 e 4). Em geral, os modelos da Aproximação por Difusão e de Thompson mostraram, para todos os tratamentos, valores elevados do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), entre 0,93 a 0,99; contudo, Madamba et al. (1996) ressaltam que o coeficiente de

determinação ( $R^2$ ) não é capaz de, sozinho, determinar satisfatoriamente o melhor modelo tornando-se viável, portanto, a avaliação dos demais coeficientes calculados, para sua definição.

Para Kashaninejad et al. (2007) e Mohapatra & Rao (2005), valores para o erro médio relativo (P), inferiores a 10%, são recomendados para a seleção de modelos. Os valores do erro médio relativo (P) indicam o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo. Na presente situação foram poucos os modelos que apresentaram valores menores que 10% para o erro médio relativo (P) e somente para alguns tratamentos. Verificou-se que novamente o modelo da Aproximação por Difusão teve o melhor desempenho, para o qual foram encontrados os menores valores do desvio padrão da estimativa (SE) e nele se encontra, também, o maior número de tratamentos com valores abaixo de 10% para o erro médio relativo (P). Os coeficientes de regressão ( $R^2$ ) foram todos superiores a 96%.

Neste contexto e nas condições em que o trabalho foi conduzido, o modelo da Aproximação por Difusão foi selecionado para representar a cinética de secagem das sementes de crambe. Obteve-se, para o modelo de Thompson, ajuste excelente, podendo também ser usado na representação da cinética de secagem em camada fina das sementes de crambe. Ressalta-se que o modelo da Aproximação por Difusão foi recomendado para representação da cinética de secagem de alguns produtos, como café (Resende et al., 2009), feijão (Corrêa et al., 2007) e fibra do abacaxi (Waughon & Pena, 2008), dentre outros. Já o modelo de Thompson foi recomendado para representação da cinética de secagem de produtos como: milho (Souza et al., 2002), farelo de mamona (Sousa et al., 2006), dentre outros.

Nas curvas de secagem em camada fina das sementes de crambe, já ajustadas ao modelo da Aproximação por Difusão, verifica-se que o tempo necessário para o crambe atingir teor de água de equilíbrio higroscópico com o ar de secagem foi diretamente proporcional ao teor de água na semente, sendo de 12, 10, 8, 6 e 4 h para a temperatura de 30 °C; de 7, 6,5, 3,6, 3,5 e 3,4 h para 40 °C e de 4, 3,1, 2,9, 2,6 e 1,5 h para temperatura de 50 °C; 2,7, 2,6, 2,5, 1,5 e 1 h para temperatura de 60 °C; 2, 1,9, 1,4, 1, 0,9 h para temperatura de 70 °C, considerando-se os teores de água de 0,28, 0,25, 0,17, 0,13, e 0,11 b.s respectivamente (Figura 2).

O aumento da temperatura do ar de secagem promoveu maior taxa de remoção de água do produto, evidenciando-se o acréscimo da taxa de secagem, fato confirmado em outros trabalhos de pesquisa (Akpınar, 2006; Babalis & Belessiotis, 2004; Mohapatra & Rao, 2005). Em adição, pode-se dizer que esses resultados estão bem próximos aos de Costa et al. (2011), ao afirmarem tempos de secagem das sementes de crambe de 20,5; 8,5; 5,0; 5,0; e 2,75 h para as temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente, considerando também a redução do teor de água de 0,26 para 0,09 (decimal b.s.).

A magnitude da constante de secagem (k) aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem (Tabela 3). Tendo em vista os resultados obtidos optou-se por gerar uma equação para estimativa deste parâmetro, em função da variável temperatura do ar de secagem (T). De modo geral não se

**Tabela 2.** Parâmetros estatísticos obtidos para doze modelos de secagem, considerando-se as temperaturas de 30 e 40 °C

Teor de água (%) b.s.	Modelo	Temperatura de 30 °C				Temperatura de 40 °C			
		R <sup>2</sup>	SE	P	Res	R <sup>2</sup>	SE	P	Res
28	Page	0,98	0,04	122,05	TD	0,99	0,03	36,62	TD
	Midilli	0,99	0,03	51,47	TD	0,99	0,02	18,48	AL
	H&P	0,97	0,06	50,29	TD	0,97	0,06	11,45	TD
	H&P Mod	0,97	0,07	50,29	TD	0,97	0,07	11,45	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,03	4,68	TD	0,99	0,01	9,45	AL
	Dois Termos	0,97	0,06	50,29	TD	0,97	0,06	11,45	TD
	Exp. D. Termos	0,94	0,08	40,76	TD	0,96	0,06	18,70	TD
	Logaritmico	0,97	0,06	10,66	TD	0,97	0,06	19,55	TD
	Verma	0,90	0,10	33,89	TD	0,92	0,09	28,90	TD
	Newton	0,90	0,10	27,41	TD	0,92	0,09	28,90	TD
	Thompson	0,98	0,05	8,58	TD	0,99	0,04	49,94	TD
	Wang e Sing	0,72	0,17	94,31	TD	0,64	0,19	172,64	TD
25	Page	0,96	0,06	35,26	TD	0,96	0,07	24,19	TD
	Midilli	0,98	0,21	16,98	TD	0,97	0,07	22,86	TD
	H&P	0,96	0,07	8,59	TD	0,94	0,08	9,46	TD
	H&P Mod	0,96	0,08	8,59	TD	0,94	0,11	9,46	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,02	11,70	AL	0,99	0,04	10,86	AL
	Dois Termos	0,96	0,08	8,59	TD	0,94	0,09	9,46	TD
	Exp. D. Termos	0,91	0,10	23,31	TD	0,92	0,09	18,27	TD
	Logaritmico	0,96	0,07	8,77	TD	0,94	0,09	20,97	TD
	Verma	0,87	0,12	32,51	TD	0,89	0,12	30,73	TD
	Newton	0,87	0,12	32,51	TD	0,89	0,11	25,37	TD
	Thompson	0,96	0,02	44,53	TD	0,95	0,07	32,35	TD
	Wang e Sing	0,70	0,18	77,32	TD	0,64	0,20	73,91	TD
17	Page	0,98	0,04	7,36	TD	0,99	0,03	6,22	AL
	Midilli	0,99	0,02	2,21	AL	0,99	0,02	4,86	AL
	H&P	0,95	0,07	12,24	TD	0,92	0,09	25,05	TD
	H&P Mod	0,95	0,08	12,24	TD	0,92	0,11	25,05	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,03	3,55	TD	0,99	0,02	4,79	AL
	Dois Termos	0,95	0,07	12,24	TD	0,92	0,09	25,05	TD
	Exp. D. Termos	0,94	0,07	18,03	TD	0,94	0,08	24,72	TD
	Logaritmico	0,95	0,07	10,98	TD	0,94	0,08	27,13	TD
	Verma	0,89	0,11	26,11	TD	0,89	0,11	39,03	TD
	Newton	0,89	0,09	26,11	TD	0,89	0,09	30,85	TD
	Thompson	0,98	0,05	8,18	TD	0,99	0,03	5,83	AL
	Wang e Sing	0,73	0,16	37,15	TD	0,39	0,24	56,19	TD
13	Page	0,93	0,08	97,47	TD	0,99	0,03	18,33	TD
	Midilli	0,87	0,12	45,11	TD	0,82	0,16	26,09	TD
	H&P	0,84	0,12	43,73	TD	0,96	0,06	23,02	TD
	H&P Mod	0,84	0,16	43,73	TD	0,96	0,09	23,02	TD
	Apr. Difusão	0,96	0,06	69,54	TD	0,99	0,02	11,70	TD
	Dois Termos	0,84	0,14	43,73	TD	0,96	0,07	23,02	TD
	Exp. D. Termos	0,79	0,14	27,07	TD	0,98	0,05	14,17	TD
	Logaritmico	0,85	0,13	60,20	TD	0,97	0,06	22,59	TD
	Verma	0,73	0,17	39,95	TD	0,96	0,07	27,35	TD
	Newton	0,73	0,15	39,95	TD	0,96	0,07	27,35	TD
	Thompson	0,93	0,08	83,05	TD	0,99	0,03	22,04	TD
	Wang e Sing	0,51	0,22	88,18	TD	0,74	0,17	86,16	TD
11	Page	0,93	0,09	18,90	AL	0,99	0,03	3,70	TD
	Midilli	0,95	0,08	15,40	AL	0,86	0,14	19,62	TD
	H&P								
	H&P Mod	0,82	0,14	19,10	TD	0,92	0,09	33,77	TD
	Apr. Difusão	0,82	0,19	19,10	TD	0,92	0,14	33,77	TD
	Dois Termos	0,96	0,07	15,04	AL	0,99	0,02	3,07	TD
	Exp. D. Termos	0,82	0,16	19,10	TD	0,92	0,11	33,77	TD
	Logaritmico	0,78	0,16	31,79	TD	0,94	0,08	27,08	TD
	Verma	0,83	0,15	24,30	TD	0,97	0,06	11,15	TD
	Newton	0,70	0,19	38,56	TD	0,91	0,10	35,69	TD
	Thompson	0,70	0,17	38,56	TD	0,91	0,09	35,69	TD
	Wang e Sing	0,93	0,09	18,20	TD	0,99	0,03	3,76	TD
Page	0,46	0,25	47,46	TD	0,64	0,19	54,00	TD	

**Tabela 3.** Parâmetros estatísticos obtidos para doze modelos de secagem, com base nas temperaturas de 50 e 60 °C

Teor de água (%) b.s	Modelo	Temperatura de 50 °C				Temperatura de 60 °C			
		R <sup>2</sup>	SE	P	Res.	R <sup>2</sup>	SE	P	Res.
28	Page	0,99	0,01	3,41	AL	0,99	0,01	6,54	AL
	Midilli	0,99	0,01	2,79	AL	0,99	0,01	7,63	AL
	H&P	0,97	0,05	19,10	TD	0,96	0,06	30,50	TD
	H&P Mod	0,97	0,06	19,10	TD	0,96	0,08	30,50	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,01	3,97	AL	0,99	0,01	7,98	AL
	Dois Termos	0,97	0,06	13,29	TD	0,96	0,07	30,50	TD
	Exp. D. Termos	0,99	0,04	15,82	TD	0,98	0,05	25,73	TD
	Logaritmico	0,98	0,05	10,55	TD	0,97	0,06	14,75	TD
	Verma	0,96	0,07	24,29	TD	0,95	0,07	34,26	TD
	Newton	0,96	0,06	24,29	TD	0,95	0,07	34,26	TD
	Thompson	0,99	0,02	7,18	AL	0,99	0,02	6,79	AL
	Wang e Sing	0,45	0,23	95,74	TD	0,22	0,26	151,64	TD
25	Page	0,98	0,05	6,38	TD	0,99	0,02	18,97	AL
	Midilli	0,99	0,02	3,52	AL	0,99	0,03	11,10	AL
	H&P	0,91	0,09	16,45	TD	0,99	0,02	22,12	AL
	H&P Mod	0,91	0,12	16,45	TD	0,99	0,04	22,12	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,03	3,00	TD	0,99	0,02	15,87	TD
	Dois Termos	0,91	0,10	16,45	TD	0,99	0,03	22,12	TD
	Exp. D. Termos	0,90	0,09	21,60	TD	0,99	0,02	12,56	AL
	Logaritmico	0,92	0,09	14,12	TD	0,99	0,02	19,71	TD
	Verma	0,84	0,13	28,28	TD	0,99	0,03	22,09	AL
	Newton	0,84	0,12	28,28	TD	0,99	0,02	22,09	TD
	Thompson	0,98	0,05	6,74	TD	0,99	0,02	8,90	TD
	Wang e Sing	0,65	0,19	37,62	TD	0,61	0,23	75,16	TD
17	Page	0,99	0,01	6,38	TD	0,98	0,05	8,95	TD
	Midilli	0,99	0,01	3,52	AL	0,73	0,21	7,13	TD
	H&P	0,99	0,04	16,45	TD	0,86	0,13	34,94	TD
	H&P Mod	0,99	0,05	16,45	TD	0,86	0,19	34,94	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,01	3,00	TD	0,99	0,02	3,24	TD
	Dois Termos	0,99	0,04	16,45	TD	0,86	0,15	34,94	TD
	Exp. D. Termos	0,99	0,02	21,60	TD	0,85	0,13	37,49	TD
	Logaritmico	0,99	0,03	14,12	TD	0,90	0,11	52,28	TD
	Verma	0,99	0,04	28,28	TD	0,85	0,14	37,49	TD
	Newton	0,99	0,03	28,28	TD	0,85	0,12	37,49	TD
	Thompson	0,99	0,01	6,74	TD	0,97	0,06	12,20	TD
	Wang e Sing	0,63	0,20	37,62	TD	0,24	0,29	60,60	TD
13	Page	0,99	0,03	138,36	AL	-	-	-	-
	Midilli	0,72	0,21	99,01	TD	0,75	0,19	35,02	TD
	H&P	0,89	0,11	28,97	TD	0,96	0,06	18,03	TD
	H&P Mod	0,88	0,17	28,97	TD	0,96	0,09	18,03	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,02	95,93	TD	0,99	0,02	2,25	AL
	Dois Termos	0,89	0,13	28,97	TD	0,96	0,07	18,03	TD
	Exp. D. Termos	0,91	0,09	54,67	TD	0,98	0,05	12,80	TD
	Logaritmico								
	Verma	0,94	0,09	187,98	TD	0,97	0,07	69,45	TD
	Newton	0,88	0,12	26,46	TD	0,96	0,07	20,20	TD
	Thompson	0,88	0,11	26,46	TD	0,96	0,07	20,20	TD
	Wang e Sing	0,99	0,04	3,91	TD	0,99	0,03	5,65	TD
Page	0,24	0,29	79,43	TD	0,55	0,22	37,80	TD	
11	Page	0,99	0,03	4,59	TD	*	-	-	-
	Midilli	0,83	0,20	30,71	TD	0,99	0,02	15,17	AL
	H&P	0,94	0,09	27,64	TD	0,94	0,07	28,14	TD
	H&P Mod	0,94	0,21	27,64	TD	0,94	0,09	28,14	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,02	2,86	AL	0,99	0,02	9,35	TD
	Dois Termos	0,94	0,12	32,48	TD	0,94	0,08	28,14	TD
	Exp. D. Termos	0,96	0,08	29,04	TD	0,97	0,06	21,58	TD
	Logaritmico	0,97	0,08	17,44	TD	0,95	0,07	44,21	TD
	Verma	0,94	0,11	32,60	TD	0,94	0,08	30,92	TD
	Newton	0,94	0,09	32,60	TD	0,94	0,07	30,92	TD
	Thompson	0,99	0,03	9,82	AL	0,99	0,03	17,87	AL
	Wang e Sing	0,52	0,26	60,09	TD	0,45	0,23	94,03	TD

\* não houve regressão

**Tabela 4.** Parâmetros estatísticos obtidos para doze modelos de secagem, com base na temperatura de 70 °C

Teor de água (%) b.s	Modelo	R <sup>2</sup>	SE	P	Resíduo
28	Page	*	-	-	-
	Midilli	0,99	0,02	18,24	TD
	H&P	0,97	0,06	23,68	TD
	H&P Mod	0,97	0,08	23,68	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,01	9,65	AL
	Dois Termos	0,97	0,06	23,68	TD
	Exp. D. Termos	0,98	0,04	14,81	TD
	Logaritmico	0,97	0,05	25,75	TD
	Verma	0,97	0,06	26,29	TD
	Newton	0,97	0,06	26,29	TD
	Thompson	0,99	0,02	22,45	TD
	Wang e Sing	0,19	0,28	145,65	TD
25	Page	*	-	-	-
	Midilli	0,99	0,02	18,44	AL
	H&P	0,97	0,05	27,01	TD
	H&P Mod	0,97	0,07	27,01	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,01	9,00	AL
	Dois Termos	0,97	0,06	27,01	TD
	Exp. D. Termos	0,99	0,04	16,72	TD
	Logaritmico	0,98	0,05	68,80	TD
	Verma	0,97	0,06	28,95	TD
	Newton	0,97	0,05	28,95	TD
	Thompson	0,99	0,02	24,44	TD
	Wang e Sing	0,13	0,29	200,76	TD
17	Page	*	-	-	-
	Midilli	0,99	0,03	14,93	TD
	H&P	0,98	0,06	21,95	TD
	H&P Mod	0,98	0,09	21,95	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,02	8,24	AL
	Dois Termos	0,98	0,07	21,95	TD
	Exp. D. Termos	0,99	0,04	13,53	TD
	Logaritmico	0,98	0,06	49,45	TD
	Verma				
	Newton	0,98	0,06	24,10	TD
	Thompson	0,98	0,05	24,10	TD
	Wang e Sing	0,99	0,03	21,30	AL
Exp. D. Termos	0,47	0,27	230,75	TD	
13	Page	*	-	-	-
	Midilli	0,59	0,25	58,45	TD
	H&P	0,96	0,07	28,13	TD
	H&P Mod	0,96	0,11	28,13	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,01	2,57	TD
	Dois Termos	0,96	0,08	28,13	TD
	Exp. D. Termos	0,97	0,05	21,16	TD
	Logaritmico	0,97	0,0	27,62	TD
	Verma	0,96	0,08	28,90	TD
	Newton	0,96	0,07	28,90	TD
	Thompson	0,99	0,02	4,03	TD
	Wang e Sing	0,29	0,28	64,41	TD
11	Page	*	-	-	-
	Midilli	0,77	0,24	10,49	TD
	H&P	0,97	0,07	13,38	TD
	H&P Mod	0,97	0,15	13,38	TD
	Apr. Difusão	0,99	0,02	3,29	TD
	Dois Termos	0,97	0,09	13,38	TD
	Exp. D. Termos	0,98	0,05	9,76	TD
	Logaritmico	0,97	0,07	15,71	TD
	Verma	0,97	0,08	13,64	TD
	Newton	0,97	0,06	13,64	TD
	Thompson	0,99	0,04	8,31	TD
	Wang e Sing	0,72	0,20	26,60	TD

\* não houve regressão

verificou, para uma mesma temperatura, tendência de variação da constante de secagem com o teor de água, razão pela qual foram calculadas as médias dos seus valores para cada temperatura testada. Tais resultados corroboram com as afirmações de Brooker et al. (1992); para os autores, o valor de “k” varia com a temperatura de secagem e o teor de água inicial do produto.

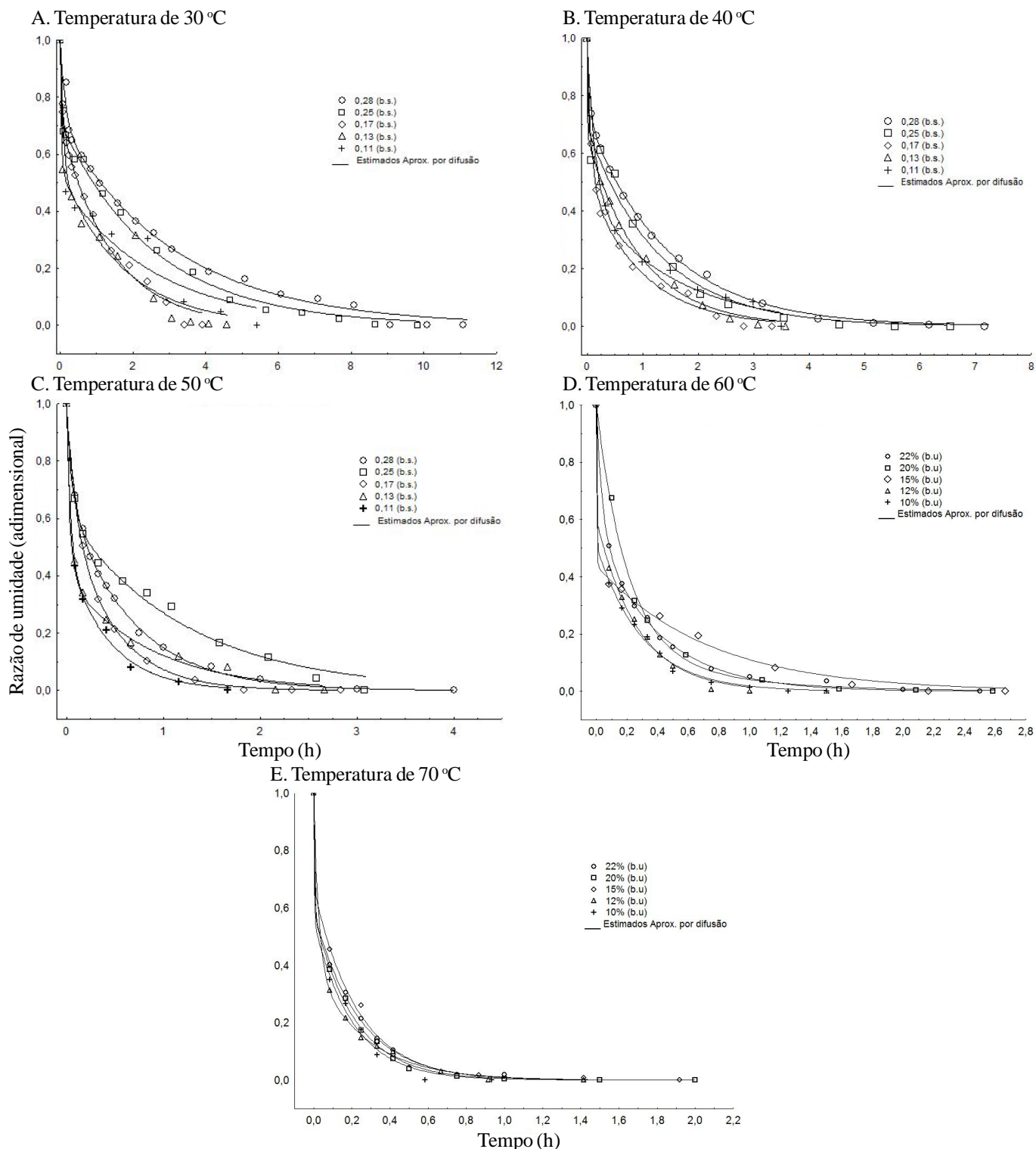
Madamba et al. (1996) e Babalis & Belessiotis (2004) consideram que a constante de secagem (k) pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, e está relacionada à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente e à difusão líquida que controla o processo. Devido ao aumento do valor médio de k, com a elevação da temperatura, esta dependência pode ser descrita por meio da equação de Arrhenius (Figura 3), em que se nota, pelo comportamento linear dos valores observados, a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada.

A Eq. 19 apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius para a constante de secagem do modelo da Aproximação por Difusão para a secagem do crambe em camada fina. Observa-se que a energia de ativação para o processo de secagem foi de 4,021 kJ mol<sup>-1</sup> para a faixa de temperatura entre 30 e 70 °C. Nos processos de secagem quanto menor a energia de ativação maior é a difusividade de água no produto. Corrêa et al. (2007) encontraram, para sementes de feijão, energia de ativação relacionada ao fator k pelo modelo de Page, um valor de 10,08 kJ mol<sup>-1</sup> mostrando-se, portanto, superior aos verificados aqui, para sementes de crambe.

$$k = 15,7995 \cdot \exp\left(\frac{4021,44}{RT}\right) \quad (19)$$

Para a determinação do coeficiente de difusão efetivo fez-se o ajuste dos dados experimentais da secagem do crambe ao modelo matemático da difusão líquida para a forma geométrica esférica, por meio de regressão não-linear, utilizando-se a Eq. 16 com aproximação de oito termos e se considerando, ainda, o raio equivalente igual a 0,15 cm (Tabela 5). A utilização desta quantidade de termos na equação está de acordo com Afonso Júnior & Corrêa (1999), que avaliaram os resultados de secagem de sementes de feijão, ajustando o modelo de difusão com aproximação de oito termos e verificaram aproximação adequada da série, para fornecer estimativas satisfatórias da taxa de secagem do produto. Os valores do coeficiente de difusão, calculados para o crambe, estão de conformidade com outros encontrados na literatura para secagem de produtos agrícolas que se apresentam na ordem de 10<sup>-9</sup> a 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> (Madamba et al., 1996).

Os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o incremento da temperatura do ar de secagem (Tabela 5). Costa et al. (2011) encontraram valores de coeficiente de difusão das sementes de crambe iguais a 0,88 x 10<sup>-11</sup>; 1,99 x 10<sup>-11</sup>; 2,90 x 10<sup>-11</sup>; 3,48 x 10<sup>-11</sup>; 5,85 x 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 70 °C, sendo esses inferiores aos encontrados no presente trabalho. Esta diferença pode ser atribuída, provavelmente, à contração volumétrica das

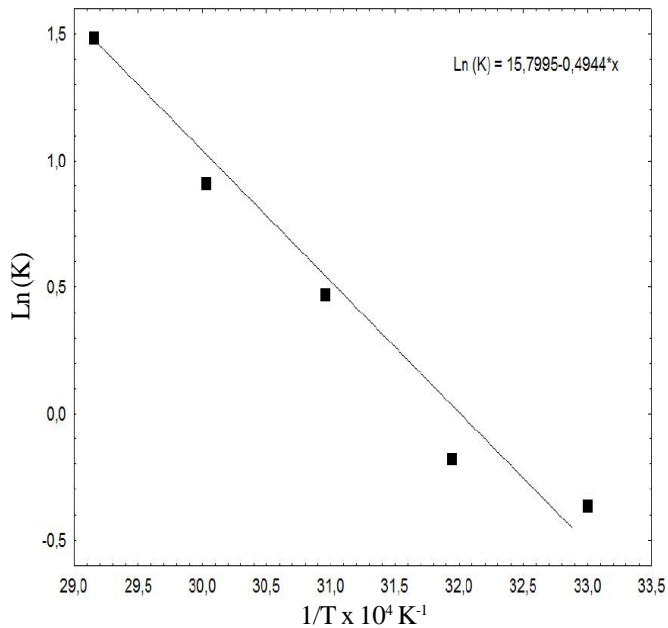


**Figura 2.** Valores experimentais e estimados pelo modelo da Aproximação por difusão, em função da razão de umidade durante a secagem das sementes de crambe, nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C

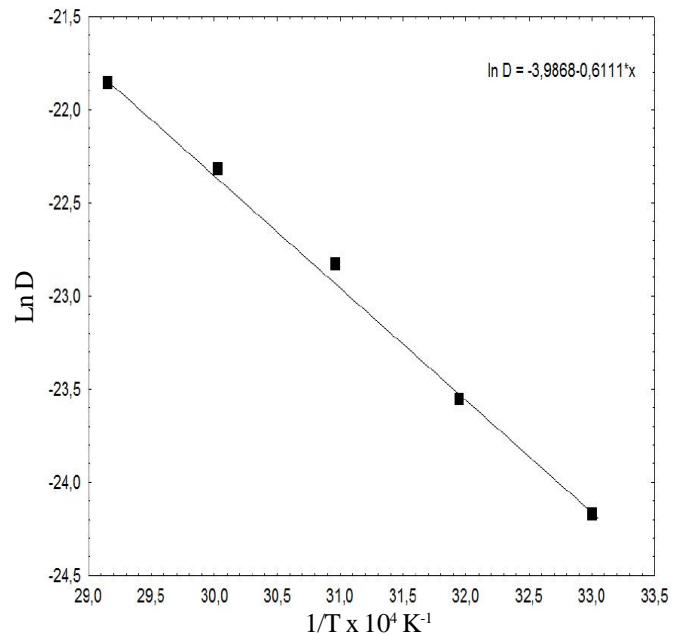
sementes de crambe durante a secagem, já que o raio equivalente, utilizado no presente trabalho, foi de 1,5 mm, enquanto no trabalho dos citados autores, foi de 3,7 mm. Recomendam-se, portanto, maiores estudos sobre o fenômeno em questão destacando-se que o coeficiente de difusão efetivo é utilizado devido à pouca informação referente à forma de movimento da água durante a secagem, além da complexidade do processo.

Para cada temperatura do ar de secagem utilizada foi feita a média dos valores do coeficiente de difusão efetivo, obtida para os diferentes teores de água da semente. A dependência do coeficiente de difusão em relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (Madamba et al., 1996; Resende et al., 2005; Corrêa et al., 2007; Goneli et al., 2007; Kashaninejad et al., 2007; Martinazzo et al., 2007; Resende et al., 2007).





**Figura 3.** Representação de Arrhenius para a constante de secagem do modelo da Aproximação por difusão, durante a secagem das sementes de crambe em camada fina



**Figura 4.** Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetiva, em função da temperatura do ar de secagem

**Tabela 5.** Parâmetros do modelo da aproximação por difusão obtidos nos diferentes tratamentos de secagem das sementes de crambe

Temperatura (°C)	Teores de água (%b.u)	D x 10 <sup>-10</sup> (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	SE (adimensional)	R <sup>2</sup> (decimal)
30	22	0,181	0,001286	0,986417
	20	0,233	0,003046	0,969214
	15	0,410	0,001381	0,984530
	12	0,488	0,007179	0,894540
	10	0,394	0,005255	0,888010
40	22	0,387	0,000639	0,993470
	20	0,481	0,003947	0,962320
	15	0,952	0,002222	0,974740
	12	0,643	0,000964	0,990140
	10	0,632	0,002871	0,968290
50	22	0,872	0,000497	0,994390
	20	0,581	0,002646	0,969930
	15	1,286	0,000689	0,993040
	12	1,782	0,005258	0,946510
	10	2,293	0,002779	0,977080
60	22	1,838	0,000799	0,990200
	20	1,494	0,003093	0,974920
	15	1,857	0,007130	0,928440
	12	2,506	0,001077	0,988310
	10	2,735	0,001640	0,980570
70	22	2,897	0,000892	0,989780
	20	3,240	0,000783	0,991110
	15	2,647	0,001138	0,990290
	12	3,917	0,001890	0,980620
	10	3,638	0,001658	0,986320

Nos valores de  $\ln(D)$  em função do inverso da temperatura absoluta ( $1/T_a$ ), pode-se constatar que a linearidade decrescente evidencia a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada (Figura 4). A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação  $E/R$  enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ .

A Eq. 20 representa os coeficientes da equação ajustada para o coeficiente de difusão do crambe. Para Kashaninejad et al. (2007), a energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto. Constatou-se, na presente situação, que a energia de ativação para difusão líquida das sementes de crambe, foi de aproximadamente  $4,970 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Eq. 20). Destaca-se que nos processos de secagem quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto.

$$D = -3,9868 \exp\left(\frac{4970,68}{RT}\right) \quad (20)$$

A energia de ativação encontrada neste trabalho foi menor que a encontrada por Costa et al. (2011), cujo valor foi de  $37,07 \text{ kJ mol}^{-1}$  durante a secagem com faixa de temperatura de 30 a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Alguns autores estudaram a energia de ativação para diversos produtos agrícolas, a exemplo de Goneli (2008), que verificou o valor de  $15,25 \text{ kJ mol}^{-1}$  para sementes de mamona, e Resende et al. (2007) que encontraram o valor de  $6,748 \text{ kJ mol}^{-1}$  para o feijão. Para Zogzas et al. (1996), a energia de ativação para os produtos agrícolas varia entre 12,7 a  $110 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Destaca-se, por fim, que a energia de ativação para a difusão de água do crambe foi inferior aos valores observados na literatura, sinal de que o produto em estudo apresenta maior facilidade em absorver água durante a embebição (Resende et al., 2007).

## CONCLUSÕES

1. Dentre os modelos testados, o da Aproximação por Difusão representa satisfatoriamente o processo de secagem das sementes do crambe sendo, portanto, o modelo selecionado

para descrever a cinética de secagem das sementes de crambe em camada fina.

2. O coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre  $0,18 \times 10^{-10}$  e  $3,917 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para um raio equivalente de 1,5 mm e temperaturas entre 30 a 70 °C.

3. A relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem das sementes do crambe, de  $4,969 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

#### AGRADECIMENTOS

À Capes, pelo apoio financeiro e à pesquisa, por meio dos recursos dos programas Especial e Procad.

#### LITERATURA CITADA

- Abalone, R.; Gastón, A.; Cassinera, A. Thin layer drying of amaranth seeds. *Biosystems Engineering*, v.93, p.179-188, 2006.
- Afonso Júnior, P. C. Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento. Viçosa: UFV, 2001. 373p. Tese Doutorado
- 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*, v.3, p.349-353, 1999.
- Akpinar, E. K. Mathematical modeling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*, v.77, p.864-870, 2006.
- Babalís, S. J.; Belessiotis, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, v.65, p.449-458, 2004.
- Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília: MAPA, 2009. 395p.
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.
- Corrêa, P. C.; Araújo, E. F.; Afonso Júnior, P. C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.2, p.110-119, 2003.
- Corrêa, P. C.; Resende, O.; Martinazzo, A. P.; Goneli, A. L. D.; Botelho, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, v.27, p.501-507, 2007.
- Costa, L. M.; Resende, O.; Gonçalves, D. N.; Sousa, K. A. Coeficiente de difusão efetivo para a secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.1089-1096, 2011.
- Falasca, S. L.; Flores, N.; Lamas, M. C.; Carballo, S. M.; Anschau, A. *Crambe abyssinica*: An almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.35, p.5808-5812, 2010.
- Goneli, A. L. D.; Correa, P. C.; Resende, O.; Reis Neto, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.27, p.135-140, 2007.
- Gonelli, A. L. Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento. Viçosa: UFV, 2008. 199p. Tese Doutorado
- Janjai, S.; Mahayothee, B.; Lamlet, N.; Bala, B. K.; Precoppe, M.; Nagle, M.; Müller, J. Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi chinensis* Sonn.). *Journal of Food Engineering*, v.96, p.214-221, 2010.
- Jasper, S. P.; Biaggioni, M. A. M.; Silva, P. R. A.; Seki, A. S.; Bueno, O. C. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* hochst) produzida em plantio direto. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.395-403, 2010.
- Kashaninejad, M.; Mortazavi, A.; Safekordi, A.; Tabil, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, v.78, p.98-108, 2007.
- Li, X.; Ahlman, A.; Lindgren, H.; Zhu, L. H. Highly efficient in vitro regeneration of the industrial oilseed crop *Crambe abyssinica*. *Industrial Crops and Products*, v.33, p.170-175, 2011.
- Mabellini, A.; Vullioud, M. B.; Márquez, C. A.; Michelis, A. Kinetic drying experimental data and mathematical model for sweet cherries (*Prunus avium*). *Journal of Food Process Engineering*, v.33, p.1115-1128, 2010.
- Madamba, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, v.29, p.75-97, 1996.
- Martinazzo, A. P.; Corrêa, P. C.; Resende, O.; Melo, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.301-306, 2007.
- Masetto, T. E.; Quadros, J. B.; Moreira, F. H.; Ribeiro, D. M.; Benites Junior, I.; Rezende, R. K. S. Qualidade fisiológica e sanitária de sementes de crambe produzidas no estado de Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Oleaginosa e Fibrosa*, v.13, p.107-113, 2009.
- Midilli, A.; Kucuk, H.; Yapar, Z. A. New model for single-layer drying. *Drying Technology*, v.20, p.1503-1513, 2002.
- Mohapatra, D.; Rao, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v. 66, p.513-518, 2005.
- Moshenin, N. N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- Panchariya, P. C.; Popovic, D.; Sharma, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, v.52, p.349-357, 2002.
- Pitol, C. Crambe: uma nova opção para produção de biodiesel. Maracajú, Fundação MS, 2008. <<http://www.fundacaoms.com.br>>. 02Jan. 2011.
- Reis, R. C.; Barbosa, L.S.; Lima, M. L.; Reis, J. S.; Devilla, I. A.; Ascheri, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.347-353, 2011.

- Resende, O.; Arcanjo, R. V. ; Siqueira, V. C. ; Rodrigues, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. Acta Scientiarum - Agronomy, v.31, p.189-196, 2009.
- Resende, O.; Corrêa, P. C.; Goneli, A. L. D.; Martinazzo, A. P.; Ribeiro, R. M. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. Revista Brasileira de Armazenamento, v.30, p.163-171, 2005.
- Resende, O.; Corrêa, P. C.; Jarén, C.; Moure, A. J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. Spanish Journal of Agricultural Research, v.5, p.51-58, 2007.
- Ruas, R. A. A.; Nascimento, G. B.; Bergamo, E. P.; Daur Júnior, R. H.; Arruda, R. G. Embebição de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*). Pesquisa Agropecuária Tropical, v.40, p.61-65, 2010.
- Sacilik, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). Journal of Food Engineering, v.79, p.23-30, 2007.
- Silva, J. N.; Pinheiro Filho, J. B.; Sedyama, G. C.; Condé, A. R. Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau. Revista Brasileira de Armazenamento, v.4, p.31-38, 1979.
- Sousa, M. B.; Pedroza, J.P.; Beltrão, N. E. de M.; Severino, L. S.; Dantas, F. P. Cinética de secagem do farelo de mamona. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.8, p.135-146, 2006.
- Souza, A. D. V.; Fávoro, S. P., Ítavo, L. C.; Roscoe, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-mansão, nabo-forrageiro e crambe. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, p.1328-1335, 2009.
- Souza, C. M. A.; Queiroz, D. M.; Lacerda Filho, A. F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. Scientia Agrícola, v.59, p.653-660, 2002.
- Toebe, M.; Brumi, B.; Lopes, S. J.; Cargnelutti Filho, A.; Silveira, T. R. Estimativa da área foliar de *Crambe abyssinica* por discos foliares e por fotos digitais. Ciência Rural, v.40, p.475-478, 2010.
- Waughon, T. G. M.; Pena, R. S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, v.26, p.297-306, 2008.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying Technology, v.14, p.2225-2253, 1996.