



CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE FEIJÃO CULTIVAR IPR TANGARÁ

Wellytton Darci Quequeto¹, Valdiney Cambuy Siqueira², Lineu Franco Ferranti³, Vanderleia Schoeninger⁴ & Rafael Araujo Leite⁵

RESUMO: O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um produto de grande importância na alimentação humana devido as suas excelentes propriedades nutricionais, sendo uma das mais tradicionais fontes de proteína consumida. No entanto, se os processos pós-colheita aplicados a esta cultura forem realizados de forma inadequada podem comprometer essas propriedades. Objetivou-se com o presente trabalho descrever o comportamento da secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará, por meio do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, determinar as propriedades termodinâmicas, bem como o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo. Os grãos de feijão foram coletados com teor de água inicial de aproximadamente 30% (b.u., base úmida), e submetidos à secagem nas temperaturas de 40, 45, 50, 55 e 60 °C, em condições controladas. Aos valores de razão de umidade dos grãos de feijão foram ajustados nove modelos matemáticos, utilizados para a representação do fenômeno de secagem de diversos produtos agrícolas. Conclui-se que apenas os modelos de Page, Midilli, Dois Termos, Logarítmico, Thompson, Aproximação da Difusão e Valcam são adequados para a representação da secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará; o coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem; os valores de entalpia e entropia específica são inversamente proporcionais à temperatura do ar de secagem, enquanto que a energia livre de Gibbs aumenta com a elevação da temperatura do ar.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos matemáticos, propriedades termodinâmicas, coeficiente de difusão efetivo.

DRYING KINETICS OF BEANS GRAINS (IPR TANGARÁ CULTIVAR)

ABSTRACT: Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a product of great importance in human diet due to its excellent nutritional properties, being one of the most traditional consumed sources of protein. However, if the post-harvest processes applied to this crop are inadequately performed it may compromise these properties. In view of this crop importance and the consequences of poorly conducted postharvest processes, the objective of this study was to describe the behavior of beans from cultivar IPR Tangará drying. Thus, different mathematical models were adjust to experimental drying data as the thermodynamic properties, effective diffusion coefficient, and process activation energy were determine. The beans were collected with an initial water content of approximately 30% (w.b., wet basis), and subjected to drying temperatures of 40, 45, 50, 55 and 60 °C, under controlled conditions. The moisture ratio values of bean grains were adjusted by nine mathematical models that are used to represent others agricultural products drying phenomenon. The Page, Midilli, Two Terms, Logarithmic, Thompson, Diffusion Approximation, and Valcam models are suitable to represent the drying process of bean cultivar IPR Tangará. The effective diffusion coefficient increases with increasing drying air temperature.

KEYWORDS: Mathematical models, thermodynamic properties, effective diffusion coefficient.

1 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um produto tradicional na alimentação da população brasileira, fornecendo nutrientes essenciais ao ser humano, como proteínas, ferro, cálcio, magnésio, zinco, vitaminas

(principalmente do complexo B), carboidratos e fibras. É um excelente alimento, utilizado como alternativa em substituição a carnes ou outros produtos proteicos pela população de baixa renda (CARVALHO et al., 2014).

O feijão possui muitas variedades e por mais que exista uma grande quantidade de estudos realizados sobre a cultura, as novas variedades se apresentam carentes de

^{1 2 3 4 e 5} Universidade Federal da Grande Dourados. E-mails: wellytton_quequeto@hotmail.com ; vcambuy@yahoo.com ; lineu_franco@hotmail.com ; vanderleiaschoeninger@ufgd.edu.br ; rafael_araujo_leite@hotmail.com

trabalhos, principalmente na área pós-colheita (RIBEIRO et al., 2014).

Na fase pós-colheita do feijão, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, já que a redução do teor de água do produto diminui a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem nos grãos durante o armazenamento (ALMEIDA et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2012a). Assim, a secagem deve ser planejada e prevista, de forma a melhorar o controle e administração de várias etapas do agronegócio, desde o plantio, armazenagem, e fornecimento do produto final.

A modelagem estatística é utilizada para representar a cinética de secagem de diversos produtos, e envolvem condições como, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e características do produto. Essas informações são fundamentais para simulações matemáticas de secagem em camada espessa. Portanto, auxiliam no processo de melhoria e desenvolvimento de equipamentos de secagem, pois tem a função de simular o comportamento de cada produto durante a redução do teor de água, sob sucessivas camadas delgadas (GONELI et al., 2014; SANTOS et al., 2013; ARAUJO et al., 2017; BOTELHO et al., 2015).

O estudo das propriedades termodinâmicas é de grande importância para o dimensionamento dos equipamentos de secagem, pois envolvem o cálculo da energia necessária para que ocorra o processo e avaliam os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos (OLIVEIRA et al., 2014).

Embora seja encontrado na literatura uma gama de trabalhos na área de pós-colheita do feijão, existem muitas cultivar/variedades da cultura que ainda carecem de informações, sendo a IPR Tangará uma delas. Torna-se relevante a execução de trabalhos para fins de descrição do processo de secagem para a aplicação de melhorias na eficiência desta importante etapa pós-colheita, que impacta diretamente nos custos de produção e na qualidade final do produto. Diante disso, objetivou-se com o presente trabalho descrever o comportamento da secagem dos grãos de feijão da cultivar IPR Tangará, através do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, selecionar o que melhor representa o fenômeno, bem como determinar as propriedades termodinâmicas, o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O cultivo do feijoeiro foi realizado no período de inverno, na fazenda experimental da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). A coleta dos grãos foi realizada no momento em que os grãos se apresentavam com teor de água de 30% (b.u.). Após a coleta, o produto foi trilhado e devidamente selecionado, de forma a retirar os grãos que apresentaram avarias, minimizando as probabilidades de erro.

2.1 Secagem dos Grãos

Os grãos de feijão selecionados foram distribuídos em camada única em duas bandejas de fundo telado, as bandejas foram acopladas na parte superior de um secador experimental a fim de iniciar o processo de secagem. O secador é dotado de um sistema que controla com precisão o fluxo e a temperatura do ar de secagem.

O teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio das amostras foram determinados utilizando o método de estufa descrito pela Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), utilizando estufa de ventilação forçada a 105 ± 1 °C, durante 24 h, em três repetições.

As temperaturas do ar de secagem utilizadas foram de: 40, 45, 50, 55 e 60 °C. Este intervalo de temperatura é comumente empregado para secagem de grãos e sementes de feijão. As temperaturas foram mantidas em condições controladas e monitoradas por um termômetro. A velocidade do ar de secagem foi monitorada com o auxílio de um anemômetro de pás rotativas, e ajustada em torno de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

A secagem ocorreu até atingir o teor de água de $11 \% \pm 1,0$ (b.u.), por ser um teor de água aplicável para o armazenamento seguro e também está dentro do padrão de comercialização do feijão. Com as pesagens periódicas foram obtidos os dados necessários para ajustar os modelos matemáticos por regressão não linear.

A razão de umidade dos grãos de feijão foi determinada através da seguinte expressão:

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

em que: RX: razão de umidade do produto, adimensional; X: teor de água do produto (decimal b.s.); Xi: teor de água inicial do produto (decimal b.s.); e X: teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.).

2.2 Modelos Matemáticos

Foram ajustados aos valores de razão de umidade dos grãos de feijão da cultivar IPR Tangará, nove modelos matemáticos (SANTOS et al., 2013; DIÓGENES et al., 2013; FARIA et al., 2012; FERREIRA et al., 2012; PRATES et al., 2012), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas

Modelo	Designação do Modelo	Nº
Dois termos	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(2)
Aproximação da difusão	$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	(3)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k t)$	(4)
Midilli	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	(5)
Logarítmico	$RX = a \exp(-k t) + c$	(6)
Newton	$RX = \exp(-k t)$	(7)
Page	$RX = \exp(-k t^n)$	(8)
Thompson	$RX = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}}{2 b}\right)$	(9)
Valcam	$RX = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	(10)

t: tempo de secagem, h; k, k_0 , k_1 : parâmetros de secagem h^{-1} ; e a, b, c, d, n: coeficientes dos modelos.

2.3 Coeficiente de Difusão Efetivo

Para a determinação do coeficiente de difusão para as diversas temperaturas de secagem, foi utilizada a Equação 11, fundamentado na teoria de difusão líquida, conforme a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{3}{r}\right)^2\right] \quad (11)$$

em que: D: coeficiente de difusão líquida, $m^2 \cdot s^{-1}$; r: raio da esfera equivalente, m (0,008091 m); t: tempo de secagem, s; n: número de termos do modelo.

Para a obtenção do comprimento, largura e espessura foi utilizado um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm. Para obtenção da espessura média dos grãos de feijão, foram utilizados 50 grãos escolhidos ao acaso.

O volume dos grãos de feijão foi obtido ao longo do processo de secagem, de acordo com a seguinte expressão proposta:

$$V_g = \frac{\pi \cdot abc}{6} \quad (12)$$

em que: V_g : volume dos grãos, mm^3 ; a: comprimento, mm; b: largura, mm; e c: espessura, mm.

Para determinação do raio da esfera equivalente foi utilizado a Equação 13:

$$r = \sqrt[3]{3V/4\pi} \quad (13)$$

em que: V: volume do grão, m^3 ;

O comportamento do coeficiente de difusão efetivo em relação às diferentes temperaturas aplicadas durante o processo de secagem foi avaliado de acordo com a equação de Arrhenius, descrita na Equação 14:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (14)$$

em que: D_0 : fator pré-exponencial; R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; T_a : temperatura, K; e E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} .

2.4 Propriedades Termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, foram determinadas através das Equações 15, 16 e 17.

$$H = E_a - RT_a \quad (15)$$

$$s = R (\ln D_0 - \ln \frac{k_b}{h_p} - \ln T_a) \quad (16)$$

$$G = h - T_a s \quad (17)$$

em que: h: entalpia, J mol^{-1} ; s: entropia, J mol^{-1} ; G: energia livre de Gibbs, J mol^{-1} ; k_b : constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; e h_p : constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$.

2.5 Análise Estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton, empregando o software Statistica 8.0. Para avaliação do grau de ajuste dos modelos, consideram-se os valores do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), do desvio padrão da estimativa (SE) e o comportamento da distribuição dos resíduos. Foram calculados os valores do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE) através das Equações 18 e 19:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (18)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (19)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente; \hat{Y} : valor estimado pelo modelo; n: número de observações experimentais; e GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cinética de secagem

A maioria dos modelos ajustados apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) próximos a 0,98 (Tabela 2). Valor considerado satisfatório para representação do fenômeno de secagem (MADAMBA et al., 1996). Apenas os modelos de Henderson e Pabis e o de Newton não atenderam esse requisito. No entanto, é importante a utilização de mais critérios avaliativos para escolha do modelo. Assim, os valores de R^2 foram usados de forma suplementar, ou seja, em conjunto análise dos demais parâmetros estatísticos.

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos obtidos para os nove modelos utilizados na secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará.

Modelos	40			45			50			55			60		
	SE	P	R ²												
2	0,0515	9,45	0,944	0,0102	1,99	0,997	0,011	1,97	0,997	0,0116	2,53	0,996	0,0088	1,76	0,998
3	0,0123	2,55	0,996	0,0114	2,38	0,997	0,0123	2,37	0,996	0,0118	2,66	0,996	0,0090	1,84	0,998
4	0,0562	6,35	0,947	0,0536	10,12	0,933	0,0509	9,31	0,938	0,0444	7,58	0,952	0,0462	8,08	0,947
5	0,0028	0,31	0,999	0,0039	0,48	0,999	0,0017	0,23	0,999	0,0056	0,95	0,999	0,0031	0,36	0,999
6	0,0318	5,81	0,978	0,0311	5,54	0,978	0,0318	5,47	0,976	0,0283	4,29	0,981	0,0281	4,44	0,981
7	0,1064	15,98	0,805	0,1031	24,94	0,746	0,1025	24,47	0,743	0,0856	19,17	0,819	0,0874	19,78	0,805
8	0,0053	1,30	0,999	0,0040	0,60	0,999	0,0046	1,12	0,999	0,0073	1,35	0,998	0,0050	1,03	0,999
9	0,0078	2,04	0,998	0,0045	1,06	0,999	0,0075	1,88	0,998	0,0124	2,71	0,996	0,0092	2,09	0,997
10	0,0257	2,87	0,991	0,0229	2,76	0,991	0,0221	3,39	0,988	0,0206	2,90	0,990	0,0189	2,69	0,991

Segundo Kashaninejad et al. (2007) os valores de erro médio relativo (P) refletem o desvio dos valores observados com relação a curva estimada pelo modelo. Verifica-se que, os modelos de Henderson e Pabis, na temperatura de 45 °C, e o de Newton, em todas as temperaturas, apresentaram valores do erro médio relativo superiores a 10% (Tabela 2). Modelos com valores de erro médio relativo acima de 10% não são adequados para a descrição de um determinado fenômeno (MOHAPATRA e RAO, 2005).

O desvio padrão da estimativa (SE) demonstra a capacidade de um modelo em descrever com precisão um determinado processo físico, e que quanto menor seu valor, melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos dados experimentais (SIQUEIRA et al., 2012c). Analisando os dados da Tabela 2 verifica-se que, assim como no caso do erro médio relativo, os modelos de Henderson e Pabis e o de Newton apresentaram os valores mais altos de desvio padrão da estimativa em todas as temperaturas de secagem, e não são adequados para a representação do fenômeno de secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará.

Utilizando os critérios de seleção de modelos já descritos, observa-se que, embora os modelos de Dois Termos, Logarítmico, Thompson, Aproximação da Difusão e Valcam atendam aos requisitos estatísticos

para descrição do fenômeno, os modelos de Page e o de Midilli se destacam, por apresentarem em média maiores valores de coeficiente de determinação e menores valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa, demonstrando excelente ajuste aos dados experimentais.

Entre os modelos que apresentam melhor ajuste, o modelo de Page é o mais simples, pois utiliza um menor número de parâmetros, sendo escolhido para representar o fenômeno de secagem em camada delgada dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará.

O modelo de Page também é recomendado para a representação da secagem em camada delgada de sementes de feijão, e de diversos outros produtos agrícolas como: frutos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2013), sementes de feijão-caupi (CAMICIA et al., 2015), bagaço do maracujá-amarelo (MENEZES et al., 2013), bagaço de malte (SOUSA et al., 2016), grãos de feijão carioca (MELO et al., 2016), grãos de milho (OLIVEIRA et al., 2012), arroz em casca (MENEGETTI et al., 2012), cascas de mulungu (MARTINS et al., 2014), massa fibrosa de mandioca (CASTIGLIONI et al., 2013), entre outros.

Os valores observados e estimados pelo modelo de Page, de razão de umidade em função do tempo para as cinco

temperaturas do ar de secagem são apresentados na Figura 1. Nota-se o bom ajuste do modelo, demonstrando sua fidelidade na descrição do comportamento da secagem. Observa-se ainda que, a temperatura do ar de secagem e o tempo de secagem são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a temperatura, menor o tempo de secagem. Comportamento semelhante ao observado por Siqueira et al. (2012b) e Costa et al. (2015).

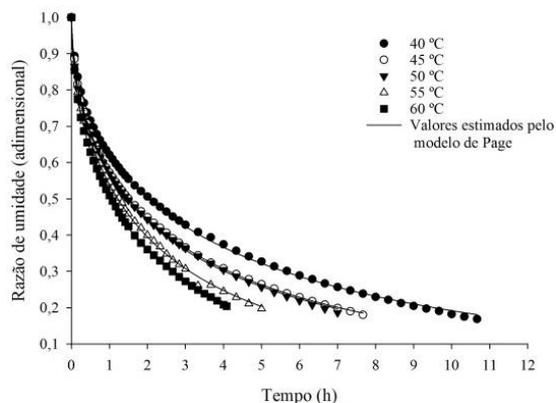


Figura 1 – Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page, para a secagem dos grãos de feijão da cultivar IPR Tangará.

Na tabela 3 são apresentados os parâmetros do modelo de Page ajustados aos dados experimentais de secagem nas diferentes condições de temperatura. Verifica-se que, conforme a temperatura do ar de secagem aumenta, o parâmetro “k” torna-se maior. Este parâmetro é utilizado como uma aproximação para descrever o efeito da temperatura e se relaciona à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, e à difusão líquida que controla o processo (MADAMBA et al., 1996). Não foi possível observar tendência definida para o coeficiente “n” do modelo de Page, o qual reflete a resistência interna do produto a secagem.

Tabela 3 – Parâmetro e coeficiente do modelo de Page para as diferentes temperaturas do ar de secagem

Temperatura (°C)	Parâmetro e coeficiente	
	k	n
40	0,472938	0,543096
45	0,553377	0,547291
50	0,564245	0,545374
55	0,617174	0,590567
60	0,68572	0,579842

3.2 Determinação do Coeficiente de Difusão Efetivo

Os coeficientes de difusão efetivo apresentaram magnitudes entre $24,9 \times 10^{-11}$ e $45,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de temperatura compreendida de 40 a 60 °C (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores do coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem para os grãos de feijão cultivar IPR Tangará.

Temperatura (°C)	D x 10 ⁻¹¹ (m ² s ⁻¹)
40	24,9009
45	33,8869
50	35,2061
55	44,0478
60	45,9522

Camicia et al. (2015) relatam que o coeficiente de difusão do feijão-caupi apresentou valores entre $5,047 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $12,011 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de secagem de 30 a 50 °C, respectivamente. A pequena diferença entre os valores do coeficiente de difusão entre as duas espécies, provavelmente está relacionada à condição de secagem e às características peculiares de cada produto, como a forma, tamanho, estrutura morfológica e composição química.

Segundo Baptestini et al. (2015) a viscosidade dos líquidos diminui com a elevação da temperatura, assim a água se desprende com mais facilidade da matéria seca, pois a mesma se encontra com ligações intermoleculares fracas, resultando num coeficiente de difusão efetivo maior.

3.3 Influência da Temperatura

Os valores de Ln(D) em função do inverso da temperatura absoluta, para os grãos de feijão da cultivar IPR Tangará, estão apresentados na Figura 2. Nota-se que, para a faixa de temperaturas estudada, a variação da difusividade apresenta comportamento uniforme, linear e decrescente. Estando este comportamento diretamente relacionado aos valores do parâmetro “k” (Tabela 3). A inclinação da curva de representação de Arrhenius gera uma relação E/R enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D₀.

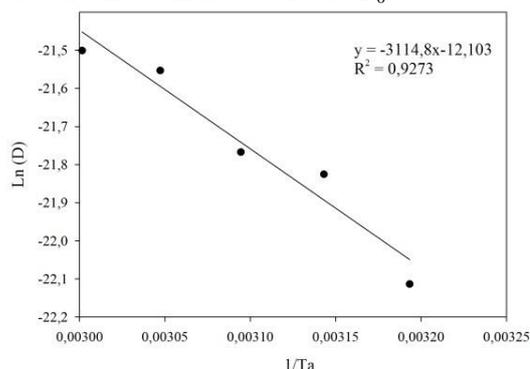


Figura 2 – Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas do ar de secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará.

Na equação 20 estão apresentados os coeficientes da equação de Arrhenius, ajustada para o coeficiente de

difusão efetivo dos grãos de feijão, calculados de acordo com a Equação 14.

$$D_{ef} = 5,5428 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{25,8964}{R T_a}\right) \quad (20)$$

A energia de ativação para desencadear o processo de secagem, considerando os mecanismos de difusão foi de 25,8964 kJ mol⁻¹. Este valor, é ligeiramente menor que os encontrados por Morais et al. (2013) e Camicia et al. (2015) trabalhando com feijão-caupi, que foram respectivamente de 27,16 kJ mol⁻¹ e 35,04 kJ mol⁻¹.

3.4 Propriedades Termodinâmicas

Os valores de entalpia específica (h), entropia específica (s) e energia livre de Gibbs (G) calculados para as diferentes condições de secagem dos grãos de feijão, se encontram apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades termodinâmicas do processo de secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará

T (°C)	h (kJ mol ⁻¹)	s (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	G (kJ mol ⁻¹)
40	23,2928	-0,3459	131,6271
45	23,2513	-0,3461	133,3572
50	23,2097	-0,3462	135,0878
55	23,1681	-0,3463	136,8192
60	23,1265	-0,3465	138,5511

Os valores de entalpia específica (h) e de temperatura do ar de secagem são inversamente proporcionais. Com a elevação da temperatura do ar de secagem, a pressão parcial de vapor da água presente nos grãos aumenta, enquanto que a pressão de vapor do ar se mantém constante durante seu aquecimento. Dessa forma, a água se movimenta do interior para a superfície do produto com mais intensidade e, por consequência reduz o tempo de secagem.

O mesmo comportamento observado para a entalpia específica, foi observado para a entropia específica (s), apresentando-se inversamente proporcional em relação à temperatura do ar de secagem. Segundo Moreira et al. (2008), esse resultado ocorre devido a menores temperaturas proporcionarem menor excitação das moléculas de água, gerando assim aumento da ordem do sistema água-produto. Os valores negativos de entropia se atribuem à existência de adsorção química ou alterações naturais do adsorvente.

A energia livre de Gibbs é um indicativo da afinidade do produto pela água, sendo um critério avaliativo para a dessorção da água. Valores de energia de Gibbs negativos, indicam que o processo de dessorção da água é espontâneo, enquanto para os valores positivos é não espontâneo (TELIS et al., 2000). Os valores observados para os grãos de feijão cultivar IPR Tangará são positivos e diretamente proporcionais a temperatura.

Este comportamento ocorre em virtude da dessorção de água nos grãos não acontecer de forma espontânea, pois necessita da energia térmica do ar de secagem para redução do teor de água.

4 CONCLUSÃO

O modelo de Page foi o escolhido para representar o fenômeno da secagem.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem.

Os valores de entalpia específica e entropia específica são inversamente proporcionais ao aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto que a energia livre de Gibbs aumenta com a elevação da temperatura do ar.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C. Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki. *Científica*, Jaboticabal, v. 41, n. 2, p. 130-137, 2013.

ARAUJO, W. D.; GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P. C.; FILHO, C. P. H.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista de Ciências Agronômicas*, Lourenço Marques, v. 48, n. 3, p.448-457, 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. **Brasília**: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D. B.; COSTA, C. F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 19, n. 12, p. 1203-1208, 2015.

BOTELHO, F. M.; GARCIA T. R. B.; VIANA, J. L.; BOTELHO, S. C. C.; SOUSA, A. M. B. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v. 14, n. 2, p. 260-272, 2015.

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

CARVALHO, J. J.; SAAD, J. C. C.; BASTOS, A. V. S.; NAVES, S. S.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, V. M. Teor e acúmulo de nutrientes em grãos de feijão comum em semeadura direta, sob déficit hídrico. *Irriga*, Botucatu, ed. esp. 1, p. 104-117, 2014.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; JÚNIOR, M. S. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 9, p. 987-994, 2013.

- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; GONCALVES, D. N.; OLIVEIRA, D. E. C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 2, p. 392-403, 2015.
- DIÓGENES, A. M. G.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, D. C.; Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, Fortaleza, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.
- FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.
- FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 6, p.855-862, 2012.
- GONELI, A. L. D.; SARATH, K. L. L.; ARAÚJO, W. D.; GANCEDO, R.; NASU, A. K. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 16, n. 2, p.434-443, 2014.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, London, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MARTINS, J. J. A.; MARQUES, J. I.; SANTOS, D. C.; ROCHA, A. P. T. Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 6, p. 1652-1660, 2014.
- MELO, P. C.; DEVILLA, I. A.; CAETANO, J. M.; REIS, V. B. S. X.; ANTUNES, A. M.; SANTOS, M. M. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. **Agrária**, Recife, v. 11, n. 3, p. 247-252, 2016.
- MENEZES, M. L.; STRÖHER, A. P.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, Maringá, v. 15, p. 176-186, 2013.
- MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2012.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer-drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista de Ciências Agrônômicas**, Lourenço Marques, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, London, v. 88, n. 4, p. 514-521, 2008.
- OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S.; CAMPOS, R.C.; CHAVES, T. H. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 11, n. 2, p. 190-201, 2012.
- OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. S. Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-manso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 147-157, 2014.
- PRATES, M. F. O.; REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA JUNIOR, A. F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.
- RIBEIRO, N. D.; DOMINGUES, L.S.; GRUHN, E. M.; ZEMOLIN, A. E. M.; RODRIGUES, J. A. Desempenho agrônômico e qualidade de cozimento de linhagens de feijão de grãos especiais. **Revista de Ciências Agrônômicas**, Lourenço Marques, v. 45, p. 92-100, 2014.
- 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**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Difusividade efetiva de grãos e frutos de pinhão-manso. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, p. 2919-2930, 2012a.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012b.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in *jatropha*

seeds during drying. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.34, n.3, p.231-238, 2012c.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista de Ciências Agronomicas**, Lourenço Marques, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

SOUSA, F. T.; DA SILVA, M. C. P.; OLIVEIRA, D. E. C.; PLACIDO, G. R.; CAGNIN, C.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G.; CALIARI, M.; LIMA, M. S. Modelagem matemática da secagem e propriedades físicas e funcionais do bagaço de malte. **Global Science and Technology**, Melbourne, v. 6, n. 3, p. 51-61, 2016.

TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochemica Acta**, Amsterdam, v. 343, n. 1-2, p. 49-56, 2000.