

DIFUSIVIDADE EFETIVA DE GRÃOS DE CHIA DURANTE A SECAGEM

ALEXANDRE A. GONÇALVES¹, ANDRÉ L. D. GONELI², CRISTIANE B. D. SILVA³,
LUANA N. S. DORNELES⁴, GUILHERME C. OBA⁵, FERNANDO A. E. CARNEIRO⁶

¹ Eng. Agrícola, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, alexandre_alvesg@hotmail.com.

² Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, UFGD / Dourados-MS, andregoneli@ufgd.edu.br.

³ Bióloga, Prof. contratada, UFGD / Dourados-MS.

⁴ Eng. Agrônoma, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS.

⁵ Eng. Agrônomo, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS.

⁶ Eng. Agrícola, UFGD / Dourados-MS.

Apresentado no

XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020
23 a 25 de novembro de 2020 - Congresso On-line

RESUMO: Objetivou-se ajustar o modelo da difusão líquida às curvas de secagem dos grãos de chia e determinar o coeficiente de difusão efetivo para diversas condições controladas de temperatura e velocidade do ar de secagem. Os grãos de chia foram colhidos com teor de água inicial de 0,28 b.s., sendo submetidos à secagem sob condições controladas de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e três velocidades de ar de secagem (0,4; 0,8; e 1,2 m s⁻¹) em um secador experimental até o teor de água aproximado de 0,098 (b.s.). Utilizou-se o modelo matemático da difusão líquida, com solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica como sendo esférica e com aproximação de oito termos. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando valores de 0,4333 e 2,5867 x 10⁻¹¹ m² s⁻¹ para as faixas de temperatura e velocidade do ar estudada. Os valores da energia de ativação para cada velocidade do ar avaliada no processo de secagem dos grãos de chia, encontram-se na ordem de 24,96; 26,31 e 33,92 kJ mol⁻¹ para suas respectivas velocidades de 0,4; 0,8 e 1,2 m s⁻¹.

PALAVRAS-CHAVE: Velocidade do ar, *Salvia Hispanica* L., Coeficiente.

EFFECTIVE DIFFUSIVENESS OF CHIA GRAINS DURING DRYING

ABSTRACT: The objective is to adjust the liquid diffusion model to the drying curves of the chia grains and to determine the effective diffusion coefficient for several controlled conditions of temperature and speed of the drying air. The chia grains were harvested with an initial water content of 0.28 bs, being subjected to drying under controlled temperature conditions (40, 50, 60, 70 and 80 °C) and three drying air speeds (0.4 ; 0.8; and 1.2 m s⁻¹) in an experimental dryer up to a water content of approximately 0.098 (bs). The mathematical model of liquid diffusion was used, with an analytical solution for Fick's second law, considering the geometric shape as being spherical and with an approximation of eight terms. Based on the results obtained, it is concluded that the effective diffusion coefficient increases with the elevation of the drying air temperature, with values of 0.4333 and 2.5867 x 10⁻¹¹ m² s⁻¹ for the temperature ranges and air velocity studied. The activation energy values for each air velocity evaluated in the drying process of chia grains, are in the order of 24.96; 26.31 and 33.92 kJ mol⁻¹ for their respective velocities of 0.4; 0.8 and 1.2 m s⁻¹.

KEYWORDS: Airspeed, *Salvia Hispanica* L., Coefficient.

INTRODUÇÃO: A secagem é uma das principais etapas da pós-colheita, uma vez que para o armazenamento seguro, o produto deve estar com o teor de água adequado, de acordo com a respectiva legislação de comercialização. Reduzindo o teor de água, reduz-se também a atividade de água, tornando as condições não ideais para proliferação de micro-organismos. Durante a secagem, para que haja a evaporação de água na superfície para o ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície. Assim, destacam-se os mecanismos: difusão líquida, que ocorre devido a quantidade de água presente no produto (gradiente de concentração); ou difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão de vapor causado pelo gradiente de temperatura para vaporizar a água contida no

produto; e pelo fluxo de líquido e vapor, que ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura (PARK et al., 2007). Os modelos, que descrevem a secagem à taxa decrescente de um sólido, consideram como o principal mecanismo, a difusão baseada na segunda lei de Fick, a qual baseia-se que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 2002). O coeficiente de difusão ou difusividade efetiva abrange todos os fenômenos que podem intervir sobre a movimentação de água em um sólido, sendo seu valor obtido por meio de ajustes de modelos aos valores experimentais. A difusividade expressa a facilidade de remoção de água de um produto. Ao alterar as condições de secagem, como temperatura e velocidade do ar, varia-se a difusividade (OLIVEIRA et al., 2006). Sendo assim, teve como objetivo ajustar o modelo da difusão líquida às curvas de secagem de grãos de chia e determinar o coeficiente de difusão efetivo para diversas condições controladas de temperatura e velocidade do ar de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS: Foram utilizados grãos de chia (*Salvia hispânica* L.) cultivada na Fazenda Experimental da Universidade Federal da Grande Dourados (FAECA), colhidos manualmente com teores de água próximos a 0,28 b.s. (base seca). Os teores de água foram determinados utilizando o método gravimétrico (BRASIL, 2009). Após o início da secagem, amostras foram retiradas e pesadas periodicamente até que o produto atingisse o teor de água desejado, com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01g. A secagem de grãos de chia em camada delgada foi realizada para cinco diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e três velocidades de ar de secagem (0,4; 0,8; e 1,2 m s⁻¹) em um secador experimental, até que o produto atingisse o teor de água de 0,098 ± 0,01 decimal b.s. Sendo o mesmo valor considerado para fins de modelagem matemática. O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de chia, para as diferentes condições de secagem, foi obtido utilizando a Equação 1, a qual tem como base a teoria da difusão líquida. Em que o raio equivalente dos grãos de chia foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais dos grãos de chia, sendo, comprimento, largura e espessura, de modo em que as leituras foram extraídas de 100 grãos escolhidos aleatoriamente, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01mm. Dessa forma obteve-se o valor de 0,62 mm para o raio equivalente. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica como sendo esférica e com aproximação de oito termos.

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[-\frac{n_t^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i \cdot \theta}{9} \cdot \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (1)$$

em que:

D_i : coeficiente de difusão efetivo, m² s⁻¹ R_e : distância radial até a superfície, m
 n_t : número de termos do modelo

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_i = D_o \exp \left(\frac{E_a}{R T_a} \right) \quad (2)$$

D_o : fator pré-exponencial E_a : energia de ativação, KJ mol⁻¹
 R : constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹ T_a : temperatura absoluta, K

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros do modelo de Page e os valores médios do coeficiente de difusão efetivo durante a secagem em camada delgada dos grãos de chia para as diferentes combinações de temperatura e velocidades do ar.

TABELA 1. Valores médios do coeficiente de difusão efetivo, para as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem dos grãos de chia

Temperatura (°C)	0,4 m s ⁻¹	0,8 m s ⁻¹	1,2 m s ⁻¹
	D _i x 10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹	D _i x 10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹	D _i x 10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹
40	0,4333	0,5977	0,6237
50	0,6455	0,9028	0,9732
60	0,8718	1,1602	1,6407
70	0,9373	1,4878	2,2158
80	1,3930	1,9397	2,5867

Constata-se através da Tabela 1 que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentarão a medida que se eleva a temperatura e velocidade do ar de secagem. Segundo Goneli et al. (2009) o aumento da temperatura promove redução na viscosidade da água, uma vez que a viscosidade é uma medida da resistência desse fluido ao escoamento, a medida em que ocorre as variações dessa propriedade modificasse a difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas, de forma a tornar o deslocamento da água do interior do produto para a periferia um processo mais simples. À medida que se eleva a temperatura e velocidade do ar de secagem, também se eleva os valores do coeficiente efetivo, fato esse atribuído devido existir maior evaporação de água na superfície do produto com o aumento da velocidade do ar. O mesmo comportamento é verificado por outros autores, como em secagem de folha de amora preta (MARTINS et al., 2018) folhas de *mentha piperita* (GASPARIN et al., 2017), semente de crambe (FARIA et al., 2012) e bagaço de cenoura (KUMAR et al., 2011). Observa-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo, ficaram compreendidos entre 0,4333 e 2,5867 x 10⁻¹¹ m² s⁻¹ para as temperaturas e velocidades do ar variando de 40 °C a 0,4 m s⁻¹ e 80 °C com 1,2 m s⁻¹, respectivamente, utilizando o raio equivalente inicial dos grãos. Os valores do coeficiente de difusão para a secagem de produtos agrícolas estão compreendidos entre 10⁻⁹ a 10⁻¹¹ m² s⁻¹, (MADAMBA et al. 1996). Desta forma os valores encontrados para o coeficiente de difusão efetivo de grãos de chia, estão distribuídos dentro na normalidade descrita por esses autores. A Figura 1 mostra os valores de ln(D) em função do inverso da temperatura absoluta (1/K⁻¹) obtidos para os grãos de chia.

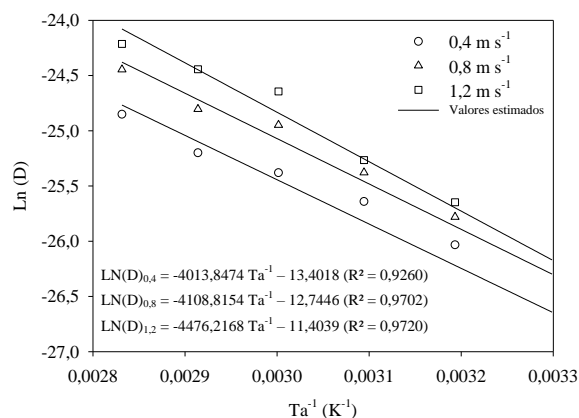


FIGURA 1. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas e para as diferentes velocidades do ar durante a secagem dos grãos de chia.

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 . A Equação (3, 4 e 5) apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius ajustada para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de chia calculados de acordo com a Equação 2.

$$D_i = 1,51 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{33,3711}{R T_a}\right) \quad 0,4 \text{ m s}^{-1} \quad (3)$$

$$D_i = 2,92 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{34,1607}{R T_a}\right) \quad 0,8 \text{ m s}^{-1} \quad (4)$$

$$D_i = 1,15 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{37,2153}{R T_a}\right) \quad 1,2 \text{ m s}^{-1} \quad (5)$$

A energia de ativação para difusão líquida, na faixa de temperatura de 40 a 80 °C, para cada velocidade do ar avaliada no processo de secagem dos grãos de chia, encontram-se na faixa de 24,96; a 33,92 kJ mol⁻¹. Segundo Kashaninejad et al. (2007) e Corrêa et al. (2007), a energia de ativação é uma resistência a qual precisa ser superada para que o processo de secagem ocorra. De acordo com Zogzas et al. (1996), a energia de ativação estabelece valores para produtos agrícolas na faixa de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, estando os valores de energia de ativação para os grãos de chia, condizentes a esta faixa.

CONCLUSÕES: O coeficiente de difusão efetivo e energia de ativação tiveram seus valores elevados conforme aumentou a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

AGRADECIMENTOS: A Capes e à Fundect, pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS:

- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, p.395, 2009.
- 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**, v.16, n.5, p.573-583, 2012.
- GASPARIN, P. P.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M, Secagem de folhas menthapiperita em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 2, p. 242-250, 2017.
- 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**, Especial Café - Viçosa - MG, n.11, p.64-73, 2009.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.1, p.98-108, 2007.
- KUMAR, N.; SARKAR, B.C.; Sharma, H.K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying. **Food Science and Technology International**, v.17, n.5, p.459-469, 2011.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MARTINS, E. S; GONELI, A. L. D; GONÇALVES, A. A; HARTMANN, C. P. F; SIQUEIRA, V. C; OBA, G. C. Cinética de Secagem de Folhas de Amora Preta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n 8, p. 570-576, 2018.
- OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.
- PARK, K.J.; VOHNIKOZA, Z.; BROD, F.P.R.. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Jornal of Food Engineering**, v.51, n.3, p.193-199, 2002.
- PARK, K.J.; PARK, K.J.B.; ALONSO, L. F. T.; CONEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. Secagem: Fundamentos e Equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.16, n.1, p.93-127, 2007.
- ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.