

**DIFUSIVIDADE EFETIVA DE FOLHAS DE AMORA-PRETA (*Morus nigra* L.) DURANTE A SECAGEM****ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS<sup>1</sup>, ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI<sup>2</sup>, ALEXANDRE ALVES GONÇALVES<sup>3</sup>, CESAR PEDRO HARTMANN FILHO<sup>4</sup>, GUILHERME CARDOSO OBA<sup>5</sup>**<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Prof. Assistente, Faculdade de Ciências Agrárias, UFGD / Dourados-MS, eltonmartins@ufgd.edu.br<sup>2</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, UFGD / Dourados-MS, andregoneli@ufgd.edu.br<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, UFGD / Dourados-MS, alexandre\_alvesg@hotmail.com<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, cphartmann21@hotmail.com<sup>5</sup> Eng. Agrônomo, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, guilherme\_oba@hotmail.com

Apresentado no

XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017  
30 de julho a 03 de agosto de 2017 - Maceió - AL, Brasil

**RESUMO:** As folhas de amora-preta (*Morus nigra* L.) possuem propriedades medicinais, sendo popularmente utilizadas no tratamento de diabetes, colesterol, problemas cardiovasculares e reposição hormonal no climatério. Desta forma, a secagem se torna importante para a conservação e o armazenamento do produto até o processamento. Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo ajustar o modelo da difusão líquida as curvas de secagem das folhas de amora-preta e determinar o coeficiente de difusão efetivo para diferentes condições do ar de secagem. As folhas de amora-preta foram colhidas com teor de água inicial de aproximadamente 67% b.u., sendo submetidas a secagem em um secador experimental de leito fixo em quatro condições controladas de temperaturas (40, 50, 60 e 70 °C) e duas velocidades do ar de secagem (0,4 e 0,8 m s<sup>-1</sup>) até atingirem o teor de água de aproximadamente 10% b.u.. Utilizou-se o modelo matemático da difusão líquida, com solução analítica para a forma geométrica de placas infinitas, com aproximação de oito termos. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura e velocidade do ar de secagem, apresentando valores entre 0,4590 e 6,6212×10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> para as condições de secagem estudada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coeficiente de difusão efetivo, Energia de ativação, Planta medicinais.

**EFFECTIVE DIFFUSIVITY OF BLACKBERRY (*Morus nigra* L.) LEAVES DURING DRYING**

**ABSTRACT:** The leaves of blackberry (*Morus nigra* L.) have medicinal properties, being popularly used in the treatment of diabetes, cholesterol, cardiovascular problems and climacteric hormone replacement. Thus, the drying becomes important for the conservation and storage of the product until processing. In view of the above, the objective of this study was to adjust the liquid diffusion model to the drying curves of the blackberry leaves and to determine the effective diffusion coefficient for different drying air conditions. The blackberry leaves were harvested at initial moisture content of approximately 67% w.b. and dried in a fixed bed experimental dryer under four controlled temperature conditions (40, 50, 60 and 70 °C) and two air velocities (0.4 and 0.8 m s<sup>-1</sup>) until reaching a moisture content of approximately 10% w.b.. The liquid diffusion mathematical model was used, with analytical solution for infinite slab geometric shape and eight terms approximation. Based on these results, it is concluded that the effective diffusion coefficient increases with increasing temperature and air velocity during drying, with values between 0.4590 and 6.6212 × 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> for the drying conditions studied.

**KEYWORDS:** Activation energy, Effective diffusion coefficient., Medicinal plant.

**INTRODUÇÃO:** A amora-preta (*Morus nigra* L.) tem origem asiática, podendo atingir de 4 a 12 m de altura. As características das plantas são folhas bastante grossas, simples e alternas, cordiformes, simétricas na base, de cor verde escura, pecíolos curtos, ásperas, com dentes largos e regulares, estípulas longas, membranosas e felpudas. Seus frutos são comestíveis de sabor agridoce, muito

sumosa e todas as partes desta planta são empregadas na medicina popular, com base no conhecimento popular (MORGAN, 1982). O chá das folhas de amora é utilizado para aliviar sintomas do climatério, sintomas de cefaleia e irritação que ocorrem no período pré-menstrual, pela presença de flavonoides, especialmente as isoflavonas (LORENZI & MATOS, 2008). O coeficiente de difusão ou difusividade efetiva engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água em um sólido, sendo o seu valor obtido por meio do ajuste de modelos aos valores experimentais, em que a difusividade expressa a facilidade de remoção de água de um produto (OLIVEIRA et al., 2006). Essa propriedade permite prever a velocidade da penetração de calor no interior do material, sendo assim de fundamental importância para o projeto de equipamentos (CARBONERA et al., 2003). A secagem de plantas medicinais e aromáticas tem por objetivo retirar um percentual elevado de água livre das células e dos tecidos, impedindo os processos de degradação enzimática e proporcionando a sua conservação, com manutenção da qualidade e composição química do produto, pelo período de tempo necessário para que se obtenha nova safra (HERTWIG, 1986). Diante do exposto, objetivou com o presente trabalho ajustar o modelo da difusão líquida as curvas de secagem das folhas de amora-preta e determinar o coeficiente de difusão efetivo para diferentes condições de temperatura (40, 50, 60 e 70 °C) e velocidades (0,4 e 0,8 m s<sup>-1</sup>) do ar de secagem.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Foram utilizadas folhas de amora-preta, colhidas com um teor de água inicial de 67 ± 2 % (b.u.). O teor de água inicial foi determinado através do método gravimétrico em estufa, a 103 ± 1 °C, durante 24 h, em triplicata (ASABE, 2010). A secagem das folhas de amora-preta foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70 °C) e velocidades do ar de secagem (0,4 e 0,8 m s<sup>-1</sup>) em um secador experimental de leito fixo, dotado de um sistema que controla com precisão a velocidade e a temperatura do ar de secagem. O secador experimental utilizado possui como fonte de aquecimento um conjunto de resistências elétricas, totalizando 12 kW de potência, um ventilador Siroco com motor de 1 cv, do fabricante Ibram, modelo VSI-160, para insuflação de ar, e possui duas bandejas removíveis para a secagem de produtos em camada delgada. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, com o auxílio de uma balança digital de 0,01g de resolução. Para fins de modelagem matemática, o teor de água como ponto final da secagem foi considerado de 10 ± 1% ( b.u.). O coeficiente de difusão efetivo das folhas de amora-preta, para as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, foi calculado utilizando-se o modelo baseado na teoria da difusão líquida, considerando-se a forma geométrica do produto com a de uma placa plana, por meio da Equação 1. Esta equação é a solução analítica para a segunda Lei de Fick e com aproximação de oito termos.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -(2n+1)^2 \cdot \pi^2 D_i \left( \frac{\theta}{4L} \right)^2 \right] \quad (1)$$

em que,

$D_i$  - coeficiente de difusão efetivo, m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>;  $L$  - espessura do produto, m;  $n$  - número de termos do modelo.

A espessura média das folhas de amora-preta foi obtida por meio da medição da espessura de 50 folhas, sendo que as leituras foram extraídas de seis pontos previamente estabelecidos de cada folha, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01mm. Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo fez-se o uso da Equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

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

em que,

$D_o$  - fator pré-exponencial;  $E_a$  - energia de ativação, kJ mol<sup>-1</sup>;  $R$  - constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;  $T_a$  - temperatura absoluta, K.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Tabela 1 são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem em camada delgada das folhas de amora-preta em diferentes temperaturas e velocidades de ar de secagem, considerando a espessura foliar média de 0,427mm.

TABELA 4. Coeficiente de difusão efetivo ( $D_i$ ) ajustado as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem em camada delgada das folhas de amora-preta.

Temperatura (°C)	$D_i \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	
	0,4 m s <sup>-1</sup>	0,8 m s <sup>-1</sup>
40	0,4590	0,7038
50	1,5008	1,5835
60	2,4058	3,1023
70	4,5459	6,6212

Verifica-se na Tabela 1, que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentam a medida em que se eleva a temperatura e velocidade do ar de secagem. Segundo GONELI et al. (2009) com a elevação da temperatura a viscosidade da água diminui, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, as variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas, tornando favorável o deslocamento da água do interior para a superfície do produto. Os mesmos autores explicam ainda, que o aumento da temperatura também promove o aumento do nível das vibrações moleculares da água, contribuindo assim para que a difusão ocorra mais rapidamente. Os valores do coeficiente de difusão efetivo das folhas de amora-preta aumentam com a elevação da velocidade do ar de secagem para uma mesma temperatura (Tabela 1).

Na Figura 1 são apresentados os valores de  $\ln(D_i)$  em função do inverso da temperatura absoluta obtido para as folhas de amora-preta. Observa-se que a linearidade decrescente caracteriza a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura e velocidade do ar de secagem estudada. A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação  $E_a/R$  enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ .

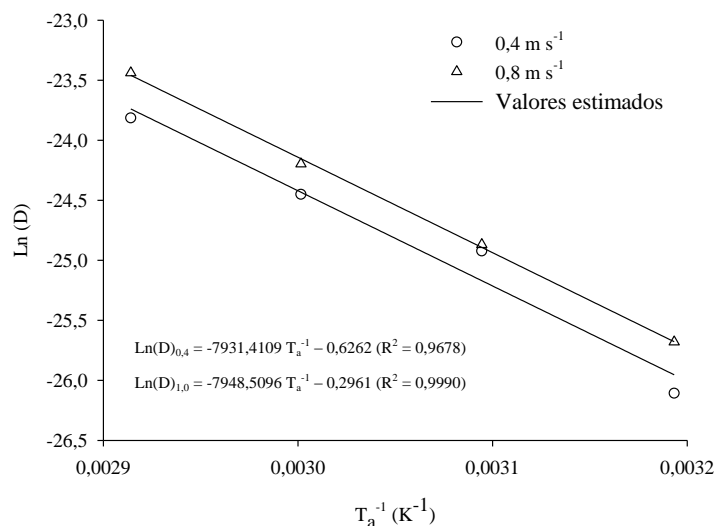


FIGURA 1. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas e velocidades do ar durante a secagem das folhas de amora-preta.

As Equações 3 e 4 apresentam os coeficientes da equação de Arrhenius ajustados para o coeficiente de difusão efetivo das folhas de amora-preta, para as velocidades do ar de secagem de 0,4 e 0,8 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, calculado de acordo com a Equação 2.

$$D_i = 0,5346 \exp\left(\frac{65,9418}{R T_a}\right) \quad (3)$$

$$D_i = 0,7437 \exp\left(\frac{66,0839}{R T_a}\right) \quad (4)$$

Pode-se observar, por meio das Equações 3 e 4, que a energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem foi de 65,94 e 66,08 kJ mol<sup>-1</sup> para as velocidades do ar de secagem de 0,4 e 0,8 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, para folhas de amora-preta na faixa de temperatura de 40 a 70 °C. Encontra-se na literatura vários valores de energia de ativação para diferentes plantas medicinais, verificando que, BARBOSA et al., (2007) com folhas de erva-cidreira-brasileira encontrou uma energia de ativação de 31,79 kJ mol<sup>-1</sup>; GONELI et al., (2014) com folhas de aroeira, 74,96 kJ mol<sup>-1</sup>; MARTINS et al. (2015) com folhas de timbó, 81,39 kJ mol<sup>-1</sup>. A energia de ativação para produtos agrícolas varia de 12,7 a 110 kJ mol<sup>-1</sup> (ZOGZAS et al., 1996), assim os valores obtidos no presente estudo estão de acordo com o relatado na literatura.

**CONCLUSÕES:** As magnitudes dos coeficientes de difusividade efetiva aumentam à medida que se eleva a temperatura e a velocidade do ar de secagem. A energia de ativação durante a difusão da água foi de 65,94 e 66,08 kJ mol<sup>-1</sup> para as velocidades do ar de secagem de 0,4 e 0,8 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente, na faixa de temperatura estudada.

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

## REFERÊNCIAS

- ASABE, S J. Moisture Measurement - Forages: Standard S358.2 DEC1988, R2008. In: **American Society of Agricultural and Biological Engineers** (ed.). Standards, Engineering Practices, and Data. St. Joseph: ASABE, p. 684-685, 2010.
- BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of Brazilian lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (MILL) N. E. BROWN). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 9, n. 1, p. 73-82, 2007.
- CARBONERA, L.; SILVA, S. A.; BARBOSA, H. R.; BORGES, J. A. S.; SILVA, W. R.; MARTINS, F. F.; SOUZA, T. N.; SILVA, V. H. C.; SALES, J. S.; COSTA, O. S. Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 6, n. 2, p. 285-290, 2003.
- 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**, v. Café, n. 11, p. 64-73, 2009.
- GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva das folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.
- HERTWIG, I. F. V. **Plantas aromáticas e medicinais**. 1. ed. São Paulo: Ícone, 1986. 449 p.
- LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas**. 2 ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda, 2008. 544p.
- MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 238-244, 2015.
- MORGAN R. **Enciclopédia das ervas e Plantas Medicinais**. São Paulo: Hemus Editora, 1982.
- 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.
- 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.