

## DIFUSIVIDADE EFETIVA DE FOLHAS DE TIMBÓ (*Serjania marginata* Casar) DURANTE A SECAGEM

ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS<sup>1</sup>, CESAR PEDRO HARTMANN FILHO<sup>1</sup>, EDUARDO ZANETTI LAGE<sup>1</sup>, ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI<sup>1</sup>, RENATO TERTULIANO GARCIA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, UFGD / Dourados-MS, elton\_asm@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Eng. Agrônomo, Mestrando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, cphartmann21@hotmail.com

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, UFGD / Dourados-MS, ezanettelage@yahoo.com.br

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, UFGD / Dourados-MS, andregoneli@ufgd.edu.br

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Agrícola, UFGD / Dourados-MS, renatotertuliano\_@hotmail.com

Apresentado no  
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014  
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

**RESUMO:** O timbó (*Serjania marginata* Casar) é uma espécie vegetal que possui propriedades medicinais. Normalmente devido ao alto teor de água, o processo de secagem se torna fundamental para manutenção da qualidade e do armazenamento do produto. Assim, o objetivo deste trabalho foi ajustar o modelo da difusão líquida às curvas de secagem de folhas de timbó e determinar o coeficiente de difusão efetiva para diversas condições controladas de temperatura. As folhas de timbó foram colhidas com teor de água inicial de aproximadamente 67% b.u., sendo submetidas à secagem sob condições de temperaturas controladas (40, 50, 60 e 70 °C), até o teor de água de aproximadamente  $7,4 \pm 2\%$  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 os resultados obtidos, conclui-se que o coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar, apresentando valores de 0,6630 e  $12,0712 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para a faixa de temperatura estudada, sendo sua relação com a temperatura podendo ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de  $81,39 \text{ kJ mol}^{-1}$  para as folhas de timbó.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia de ativação, coeficiente de difusão efetivo, curvas de secagem.

### EFFECTIVE DIFFUSIVITY OF *Serjania marginata* Casar LEAVES DURING DRYING

**ABSTRACT:** The *Serjania marginata* Casar is a species that has medicinal properties. Normally due to the high water content, the drying process becomes essential to maintaining the quality and storage of the product. The objective of this work was to adjust the liquid diffusion model to *Serjania marginata* leaves drying curves and to determine the effective diffusion coefficient for different controlled temperature conditions. The *Serjania marginata* Casar leaves were harvested with an initial moisture content of approximately 67% w.b. and submitted to drying process under controlled conditions of temperature (40, 50, 60 and 70 °C), until the approximate moisture content of  $7,4 \pm 2\%$  w.b.. The liquid diffusion mathematical model was used, with analytical solution for infinite slab geometric shape and eight terms approximation. Based on the obtained results, it can be concluded that the effective diffusion coefficient increases as the drying air temperature increased presenting values from 0,6630 e  $12,0712 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  for the temperature range tested, being that its relationship with drying temperature can be described through the Arrhenius equation, which presents an activation energy for the liquid diffusion during drying of  $81,39 \text{ kJ mol}^{-1}$  for *Serjania marginata* Casar leaves.

**KEYWORDS:** Activation energy, effective diffusion coefficient, drying curves.

**INTRODUÇÃO:** Plantas medicinais e aromáticas são fontes de matéria prima para as indústrias de alimentos, de cosméticos, e farmacêutica (ÖZTEKIN et al., 1999). Muitas plantas medicinais, como o timbó são normalmente colhidos com um teor de água inadequado para uma correta e eficiente

conservação. Sendo assim, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade após a colheita. Atualmente, pesquisas relacionadas ao estudo da cinética de secagem são realizadas com diversos produtos agrícolas, como sementes, grãos, frutos e em algumas espécies de plantas, com importância econômica. Diversas teorias e fórmulas empíricas foram desenvolvidas para prever a taxa de secagem (MARTINAZZO et al., 2007). A difusão em produtos agrícolas durante a secagem é um complexo processo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica. Segundo Brooker et al. (1992), na teoria da difusão líquida a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração. O coeficiente de difusão é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água e o seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais (MARTINAZZO et al., 2007). Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura, umidade e velocidade do ar), ela não é uma particularidade do material. Objetivou-se, no presente trabalho, determinar o coeficiente de difusão efetivo e obter a energia de ativação no processo de secagem das folhas do timbó (*Serjania marginata* Casar) em diversas condições de ar.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Foram utilizadas folhas de timbó com teor de água inicial de, aproximadamente 67% b.u.. O teor de água das amostras foi determinado pelo método gravimétrico recomendado pela ASAE (2000), para forrageiras e plantas similares, utilizando-se 25 g de produto, em três repetições, em estufa com circulação forçada de ar a  $103 \pm 2$  °C, durante 24 h. A secagem do produto foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60, 70 °C), com suas correspondentes umidades relativas do ar de secagem, durante a condução do experimento, de 19,2; 16,4; 9,3 e 4,8%, em uma estufa com ventilação forçada, até que o produto atingisse o teor de água de equilíbrio. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de psicrômetro instalado próximo à estufa, contendo as amostras. Foram colocadas no interior do equipamento, três bandejas removíveis com fundo telado para permitir a passagem do ar através da camada de produto. 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, considerou-se o fim da secagem quando o teor de água do produto estivesse próximo de  $7,4 \pm 2\%$  b.u.. O coeficiente de difusão para as diversas condições de secagem foi calculado utilizando o modelo baseado na teoria da difusão líquida, considerando uma placa plana infinita, obtido por regressão não linear, com aproximação de oito termos, utilizando o software Statística 8.0<sup>®</sup>, por meio da seguinte expressão:

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

em que,

$D_i$  - coeficiente de difusão efetivo,  $m^2 s^{-1}$ ;

$L$  - espessura do produto, m;

$\theta$  - tempo de secagem, s; e

$n$  - número de termos do modelo.

Para determinação da espessura das folhas de timbó, foram realizadas 50 repetições, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Para cada folha medida, foram feitas 3 medições em diferentes locais, sendo duas medições localizadas em cada lado da nervura central e uma medição localizada no meio da folha, próximo a nervura central. Foi calculada uma média dos valores obtidos e essa média representa a espessura das folhas, que foi de 0,5922 mm para as folhas de timbó.

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

$$D_i = D_0 \exp \left( \frac{E_a}{RT_a} \right) \quad (2)$$

em que,

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

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Tabela 1, são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem das folhas de timbó, para diferentes condições de temperatura do ar, considerando a espessura de 0,5922 mm.

TABELA 1. Coeficiente de difusão efetivo para as diferentes temperaturas de secagem das folhas de timbó.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	$D \times 10^{-11} (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$
40	0,6630
50	5,1229
60	7,0289
70	12,0712

Observando a Tabela 1, podemos notar que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o incremento da temperatura do ar de secagem. Quando há um aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares das folhas de timbó de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto. Outro fator que podemos acrescentar a essa variação do coeficiente de difusão efetivo é que, com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida. De acordo com Rizvi (1995), o coeficiente de difusão efetivo é dependente da temperatura do ar de secagem, além da variedade e composição dos materiais, dentre outros. O calor de sorção, que é uma medida da mobilidade da água dentro do produto, é outro fator que afeta a difusividade (MADAMBA et al., 1996). A variação entre os valores do coeficiente de difusão efetivo das folhas de timbó ficaram entre  $0,6630$  e  $12,0712 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para a faixa de temperatura de  $40$  a  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , utilizando-se a espessura de  $0,5922 \text{ mm}$ . De acordo com Madamba et al. (1996) os valores do coeficiente de difusão efetiva para a secagem de produtos agrícolas apresentam-se na ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , corroborando assim com o presente trabalho. A dependência do coeficiente de difusão efetivo com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (CORRÊA et al., 2007; GONELI et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007). Na Figura 1 mostram os valores de  $\ln(D)$  em função do inverso da temperatura absoluta ( $1/\text{K}^{-1}$ ) obtidos para as folhas de timbó.

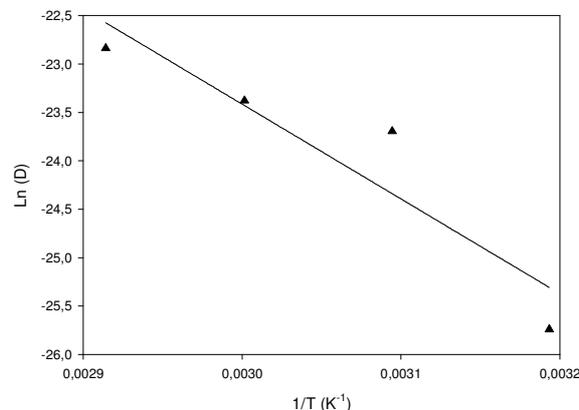


FIGURA 1. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem das folhas de timbó.

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) apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius ajustada para o coeficiente de difusão efetivo da folhas de timbó calculados de acordo com a Equação 2.

$$D_i = 0,3851 \exp\left(\frac{81389,7572}{R T_a}\right) \quad (3)$$

A energia de ativação para a difusão de água durante a secagem das folhas de timbó foi de, aproximadamente, 81,39 kJ mol<sup>-1</sup>. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto. A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto (KASHANINEJAD et al., 2007). Segundo Zogzas et al. (1996) os valores de energia de ativação para produtos agrícolas variam de 12,7 a 110 kJ mol<sup>-1</sup>, logo o valor de energia de ativação encontrado no presente trabalho esta situado nesta faixa de valores propostos por estes autores. A energia de ativação é definida, como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto. O valor da energia de ativação para as folhas de timbó apresenta-se mais elevado do que o calculado por Reis et al. (2012) avaliando a secagem de folhas de manjeriço, que obteve uma energia de ativação de 70,79 kJ mol<sup>-1</sup>, e por Martinazzo et al. (2007) na secagem de folhas de capim-limão que calculou a energia de ativação em 63,47 kJ mol<sup>-1</sup>.

**CONCLUSÕES:** O coeficiente de difusão efetivo aumenta gradativamente sua magnitude com a elevação da temperatura, considerando a espessura de 0,5922 mm para as folhas de timbó, na faixa de temperatura de 40 a 70 °C. A relação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão durante a secagem das folhas de timbó de 81,39 kJ mol<sup>-1</sup>.

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

## REFERÊNCIAS

- ASAE STANDARDS. Standards engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 2000, 78 p.
- BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book Publisher, 1992. 450p.
- 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. 501-510, 2007.
- 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.
- 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.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. de 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.
- ÖZTEKIN, S.; BASCETINÇELIK, A.; SOYSAL, Y. Crop drying programme in Turkey. **Renewable energy**, v.16, p.789-794, 1999.
- REIS, R. C. DOS; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum*L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1346-1352, 2012.
- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M.A.; RIZVI, S.S.H. **Engineering properties of foods**. New York: Academic Press, 1995. p. 223–309.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p.2225-53, 1996.