



## Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho

Renata C. dos Reis<sup>1</sup>, Ivano A. Devilla<sup>2</sup>, Diego P. R. Ascheri<sup>2</sup>,  
Ana C. O. Servulo<sup>2</sup> & Athina B. M. Souza<sup>2</sup>

### RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, determinar, modelar as curvas de secagem das folhas de Manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) por infravermelho nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C e avaliar a influência das temperaturas de secagem na cor das folhas desidratadas. A secagem foi conduzida em secador infravermelho com controle de temperatura e em estufa com circulação de ar. Aos dados experimentais foram ajustados oito modelos matemáticos. As magnitudes do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) foram utilizadas para verificar o grau de ajuste dos modelos. Do estudo concluiu-se que: a) o comportamento das curvas de secagem das folhas de manjeriço foi semelhante ao da maioria dos produtos agrícolas; os tempos de secagem no infravermelho foram menores do que na estufa com circulação de ar; b) o modelo matemático de secagem proposto por Midilli et al. (2002) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais; c) o coeficiente de difusão variou de  $9,10 \cdot 10^{-12}$  a  $2,92 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e d) a cor das amostras foi altamente influenciada pela secagem tornando-se mais escuras devido à perda de clorofila com o aumento da temperatura.

**Palavras-chave:** plantas medicinais, desidratação, temperatura, clorofila

## Kinetics of drying of basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) in the infrared

### ABSTRACT

The objective of this paper was to model the drying curves of the leaves of basil (*Ocimum basilicum* L.) in the infrared at temperatures of 50, 60, 70 and 80 °C and to evaluate the influence of drying temperature on the color of dried leaves. Drying was conducted in infrared dryer with temperature and greenhouse air circulation. Experimental data were fitted to eight mathematical models. The magnitude of the coefficient of determination ( $R^2$ ), the mean relative error (P), the estimated mean error (SE) and chi-square test ( $\chi^2$ ) were used to verify the degree of fitness of the models. From the study it was concluded that: a) the behavior of the drying curves of basil leaves was similar to most agricultural products, the drying times in the infrared were less than the drying times in an oven with air circulation, b) the mathematical drying model proposed by Midilli et al. (2002) was the one which best adjusted to the experimental data, c) the diffusion coefficient ranged from  $9.10 \times 10^{-12}$  to  $2.92 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  and d) the color of the samples was highly influenced by drying, becoming darker due to loss of chlorophyll with increasing temperature.

**Key words:** medicinal plants, dehydration, temperature, chlorophyll

<sup>1</sup> IFG, Câmpus Aparecida de Goiânia, Av. Universitária Vereador Vagner da Silva Ferreira, Qd. 1, Lt. 1-A, Parque Itatiaia, CEP 74968-755, Aparecida de Goiânia, GO. Fone: (62) 3248-5689. E-mail: [renataufg@gmail.com](mailto:renataufg@gmail.com)

<sup>2</sup> UEG, Unucet, BR 153, Quadra Área, Km 99, CEP 75132-903, Anápolis, GO. Fone: (62) 3328-1156. E-mail: [ivano.devilla@gmail.com](mailto:ivano.devilla@gmail.com); [ascheridpr@gmail.com](mailto:ascheridpr@gmail.com); [anaclaudiooservulo@hotmail.com](mailto:anaclaudiooservulo@hotmail.com); [athinabarbara@hotmail.com](mailto:athinabarbara@hotmail.com)

## INTRODUÇÃO

O manjeriço (*Ocimum basilicum*) planta tradicionalmente utilizada como erva medicinal no tratamento de dor de cabeça, tosse e diarreia, entre outros; é também considerado fonte de componentes aromáticos. Seu óleo essencial tem sido muito usado como condimento em carnes, saladas, bebidas não alcoólicas, sorvetes e na indústria de perfume e produtos de higiene bucal (Loughrin & Kasperbauer, 2001).

Com o intuito de aumentar a vida útil do manjeriço, fez-se sua secagem. Os métodos convencionais de transferência de calor restringem as possibilidades de aumentar a eficiência de secadores no processamento de determinado produto e até mesmo no aumento da capacidade de produção. Um dos fatores para o uso de radiação eletromagnética no processo de secagem é a necessidade de se aplicar fontes alternativas de energia (como o infravermelho) para reduzir o tempo e os custos com o processo (Salagnac et al., 2004).

No desenvolvimento e no aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (Berbert et al., 1995). Neste sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (Corrêa et al., 2007).

Costa et al. (2011) analisaram o coeficiente de difusão efetivo e a modelagem matemática da secagem de sementes de crambe e verificaram a existência de uma clara dependência da velocidade da secagem com a temperatura do ar.

Para verificar a taxa de secagem utiliza-se a teoria difusional, lei de Fick, que expressa o fluxo de massa por unidade de área proporcional ao gradiente de concentração de água. A difusividade é a facilidade com que a água é removida do material e varia conforme mudam as condições temperatura e velocidade do ar de secagem (Oliveira et al., 2006).

De acordo com o exposto neste trabalho, objetivou-se: a) secar folhas de manjeriço a 50, 60, 70 e 80 °C em estufa com circulação de ar e secador infravermelho, comparando o tempo e suas curvas de secagem; b) ajustar modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais obtidos definindo o melhor modelo; c) calcular o coeficiente de difusão para os dois métodos de secagem nas diferentes temperaturas; d) calcular a energia de ativação; e e) verificar se a temperatura e o método de secagem alteraram a cor das folhas de *Ocimum basilicum* L.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Secagem e Armazenagem de Produtos Vegetais da Universidade Estadual de Goiás. O manjeriço foi colhido manualmente, em estágio de floração, na cidade de Anápolis, Goiás. Selecionaram-se as folhas com ausência de partes danificadas.

Para a secagem em infravermelho utilizaram-se as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, em um secador infravermelho (Gibertini Eurotherm) com precisão de 0,001 g. Durante os testes foram colocados, para secagem, aproximadamente 2 g de folhas

de manjeriço com pesagens em intervalos de 5 min, até se atingir massa constante. Após o término de cada tratamento de secagem as folhas secas foram acondicionadas em embalagens plásticas; já para secagem na estufa com circulação de ar (Marconi MA 035) utilizaram-se as mesmas temperaturas e intervalo de tempo entre pesagens. Tanto na estufa quanto no infravermelho foram feitas 3 repetições e ajustados, aos dados experimentais, os seguintes modelos matemáticos de secagem:

- Modelo de Verma:

$$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-k_1 t) \quad (1)$$

- Modelo de logarítmico:

$$RX = a \exp(-kt) + c \quad (2)$$

- Modelo de Midilli et al. (2002):

$$RX = a \exp(-kt^n) + bt \quad (3)$$

- Modelo de Page:

$$RX = a \exp(-kt^n) \quad (4)$$

- Modelo de Newton:

$$RX = \exp(-kt) \quad (5)$$

- Modelo de Henderson e Pabis:

$$RX = a \exp(-kt) \quad (6)$$

- Modelo de dois termos:

$$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (7)$$

- Modelo de Aproximação da difusão:

$$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (8)$$

em que:

RX - razão de umidade do produto, adimensional

t - tempo de secagem, h

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> - coeficientes de secagem, s<sup>-1</sup>

a, b, c, n - constantes dos modelos, adimensional

Para o cálculo da razão de umidade (RX) utilizou-se, durante as secagens nas diferentes temperaturas, a expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (9)$$

em que:

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

X<sub>i</sub> - teor de água inicial do produto, decimal b.s.

X<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

As magnitudes do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) foram utilizadas para verificar o grau de ajuste dos modelos calculados conforme as equações abaixo:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum(Y - Y_0)^2}{GLR} \quad (12)$$

em que:

- Y - valor observado experimentalmente
- $Y_0$  - valor estimado pelo modelo
- n - número de observações experimentais
- GLR - grau de liberdade do modelo

Obteve-se o coeficiente de difusão efetivo por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Eq. 13, aos dados experimentais da secagem das folhas de manjeriço. Esa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick considerando-se a forma geométrica do produto como aproximação a uma placa plana (Brooker et al., 1992).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4} \times \left(\frac{S}{V}\right)^2\right] \quad (13)$$

em que:

- $D_{ef}$  - coeficiente de difusão efetivo,  $m^2 s^{-1}$
- S - área da placa equivalente,  $m^2$
- V - volume da placa equivalente,  $m^3$
- T - tempo, h
- N - número de termos

A solução analítica desta equação se apresenta na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento poderá determinar a precisão dos resultados.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo utilizou-se a equação de Arrhenius, descrita conforme a Eq. 14.

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

em que:

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

O teor de água do produto foi determinado pelo método padrão da estufa, a  $105 \pm 3$  °C, por 24 h, em três repetições (Brasil, 2009).

Para análise de cor utilizou-se um colorímetro tristímulo Hunter Lab (Miniscan TMXE Plus) com leitura direta de reflectância da coordenada  $L^*$  (luminosidade) em uma escala de 0 (totalmente preto) a 100 (totalmente branco). Os valores intermediários correspondem a uma escala de cinza. A coordenada  $a^*$  (tonalidades vermelha/verde) empregando-se a escala Hunter-Lab e se utilizando o iluminante  $10^\circ/D60$ . As determinações foram feitas em quinze pontos de cada folha analisada, em que os resultados foram analisados por meio de regressão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de água inicial para as folhas de manjeriço foi de 82,7% b.s. Na Tabela 1 se encontram os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os oito modelos de secagem analisados nas diversas condições de secagem via infravermelho e em estufa com circulação forçada.

No secador infravermelho as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C utilizaram tempos de 5; 2,5; 1,6 e 0,92 h, respectivamente, para que as folhas atingissem a umidade de equilíbrio. Na estufa as secagens duraram 5,8; 2,8; 1,8 e 1,2 h, respectivamente para as mesmas temperaturas; logo, é possível notar que a secagem por infravermelho demanda menor tempo de secagem e, em consequência, otimização do processo de desidratação.

Segundo Botelho et al. (2011) o aquecimento pela radiação infravermelha oferece muitas vantagens sobre a secagem convencional no qual a radiação penetra no material úmido e é convertida em calor reduzindo, assim, o período de tempo em que o material ficará exposto.

Para as quatro temperaturas utilizadas tanto na secagem por infravermelho quanto por estufa, verifica-se que todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 88%, sendo o modelo de Midilli et al. (2002) o que possui maior valor de  $R^2$  em todas as temperaturas de secagem estudadas. Os valores de P indicam o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (Kashani-Nejad et al., 2007) e, segundo Mohapatra & Rao (2005) valores inferiores a 10% são recomendados para a seleção de modelos.

Analisando o SE nos dois métodos de secagem, o modelo de Midilli et al. (2002) obteve os menores valores para todas as temperaturas; o mesmo pode ser dito para o teste do qui-quadrado pois, segundo Molina Filho et al. (2006) quanto maior for o valor do  $\chi^2$ , maior também será a discrepância entre os valores experimentais e o esperado. Para o valor do erro médio relativo (P) o modelo de Midilli et al. (2002) foi o mais satisfatório. Desta forma, o melhor modelo para descrição da secagem das folhas de *Ocimum basilicum* L. tanto por infravermelho quanto por estufa com circulação de ar, foi o de Midilli et al. (2002). As equações dos parâmetros obtidos nas diferentes condições experimentais para o modelo de Midilli et al. (2002) estão na Tabela 2.

**Tabela 1.** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em decimal, erro estimado (SE) em decimal, erro médio relativo (P) em porcentagem e o teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) em decimal, calculados para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais da secagem das folhas de *Ocimum basilicum* L., obtidos nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C por secagem em infravermelho e por estufa com circulação de ar

T (°C)	$R^2$	SE	P	$\chi^2$	$R^2$	SE	P	$\chi^2$	$R^2$	SE	P	$\chi^2$	$R^2$	SE	P	$\chi^2$
A. Infravermelho																
	Midilli et al. (2002)				Page				Henderson e Pabis				Logarítmica			
50	0,999	0,016	0,139	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,998	0,020	4,035	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0,950	0,093	12,032	$9,1 \cdot 10^{-4}$	0,986	0,061	1,584	$6,0 \cdot 10^{-3}$
60	0,998	0,028	6,255	$8,1 \cdot 10^{-4}$	0,996	0,030	27,36	$8,7 \cdot 10^{-4}$	0,955	0,097	13,702	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,977	0,085	71,552	$7,3 \cdot 10^{-3}$
70	0,999	0,017	4,816	$2,9 \cdot 10^{-4}$	0,999	0,013	4,651	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,975	0,073	13,758	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,989	0,058	79,752	$3,3 \cdot 10^{-3}$
80	0,999	0,020	7,829	$3,8 \cdot 10^{-4}$	0,993	0,037	6,877	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,928	0,115	12,165	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,988	0,057	8,209	$3,3 \cdot 10^{-3}$
	Verma				Newton				Exp. de dois termos				Aprox. por difusão			
50	0,981	0,071	2,462	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,926	0,079	13,504	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,950	0,132	12,032	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,981	0,071	2,467	$5,0 \cdot 10^{-3}$
60	0,988	0,061	8,272	$3,8 \cdot 10^{-3}$	0,935	0,082	15,754	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,977	0,098	130,705	$9,5 \cdot 10^{-3}$	0,988	0,061	8,272	$3,8 \cdot 10^{-3}$
70	0,985	0,068	15,946	$4,6 \cdot 10^{-3}$	0,961	0,063	15,589	$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,975	0,103	13,758	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,985	0,068	15,896	$4,6 \cdot 10^{-3}$
80	0,997	0,031	6,792	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,917	0,087	12,468	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,928	0,162	12,165	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,996	0,032	6,792	$1,0 \cdot 10^{-3}$
B. Estufa																
	Midilli et al. (2002)				Page				Henderson e Pabis				Logarítmica			
50	0,999	0,009	1,395	$7,0 \cdot 10^{-5}$	0,993	0,030	6,179	$9,0 \cdot 10^{-4}$	0,920	0,098	22,471	$9,7 \cdot 10^{-3}$	0,977	0,066	9,052	$4,3 \cdot 10^{-3}$
60	0,999	0,012	2,627	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,995	0,026	8,767	$7,0 \cdot 10^{-4}$	0,897	0,121	50,276	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,966	0,087	18,412	$7,5 \cdot 10^{-3}$
70	0,998	0,026	8,639	$7,0 \cdot 10^{-4}$	0,997	0,025	2,785	$6,1 \cdot 10^{-4}$	0,888	0,145	121,924	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,963	0,105	20,693	$1,1 \cdot 10^{-2}$
80	0,999	$6 \cdot 10^{-8}$	1,208	$9,0 \cdot 10^{-20}$	0,999	$2 \cdot 10^{-7}$	1,880	$10^{-19}$	0,894	0,149	73,262	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,967	0,104	26,215	$1,2 \cdot 10^{-4}$
	Verma				Newton				Exp. de dois termos				Aprox. por difusão			
50	0,971	0,074	14,411	$5,410 \cdot 10^{-3}$	0,889	0,081	26,184	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,920	0,139	22,471	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,971	0,074	14,413	$5,4 \cdot 10^{-3}$
60	0,960	0,094	33,127	$8,810 \cdot 10^{-3}$	0,867	0,096	56,640	$9,3 \cdot 10^{-3}$	0,995	0,039	11,808	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,867	0,167	56,640	$2,7 \cdot 10^{-2}$
70	0,978	0,080	41,791	$6,810 \cdot 10^{-3}$	0,869	0,110	131,506	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,980	0,089	39,408	$7,6 \cdot 10^{-3}$	0,961	0,107	69,393	$1,1 \cdot 10^{-2}$
80	0,999	0,000	2,313	$10^{-18}$	0,891	0,107	73,805	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,999	$10^{-6}$	10,016	$5,0 \cdot 10^{-18}$	0,999	$10^{-6}$	5,595	$10^{-16}$

**Tabela 2.** Parâmetros do modelo de Midilli et al. (2002) para cálculo da razão de umidade (RX) do manjeriço, em função da temperatura do ar de secagem

Meio de secagem	Parâmetro	Equação	$R^2$	SE (decimal)	P (%)	$\chi^2$ (decimal)
Estufa	a	$a = 0,985$	0,9995	0,02	3,55	$2,7 \cdot 10^{-4}$
	k	$k = 0,070T^2 - 7,843T + 218,411$				
	n	$n = 0,079T - 1,21$				
	b	$b = -0,269$				
Infravermelho	a	$a = 0,971$	0,9512	0,06	9,88	$3,6 \cdot 10^{-3}$
	k	$k = 0,017T^2 - 1,954T + 54,898$				
	n	$n = 0,026T + 1,087$				
	b	$b = -0,155$				

Para o modelo de Midilli et al. (2002) o coeficiente de secagem k e a constante n aumentaram com o aumento da temperatura; já a constante b e a constante a não demonstraram comportamento em função da temperatura de secagem e por isso estão representadas pelo valor médio.

Martinazzo et al. (2007) encontraram, como melhor modelo para a secagem de folhas de capim limão, o de Midilli et al. (2002) que também teve sua forma geométrica considerada placa plana e perceberam que o coeficiente de secagem k e a constante n aumentaram com o incremento da temperatura, confirmando os dados obtidos neste trabalho.

A Figura 1 apresenta o bom ajuste do modelo de Midilli et al. (2002) na descrição dos resultados experimentais para a secagem no infravermelho.

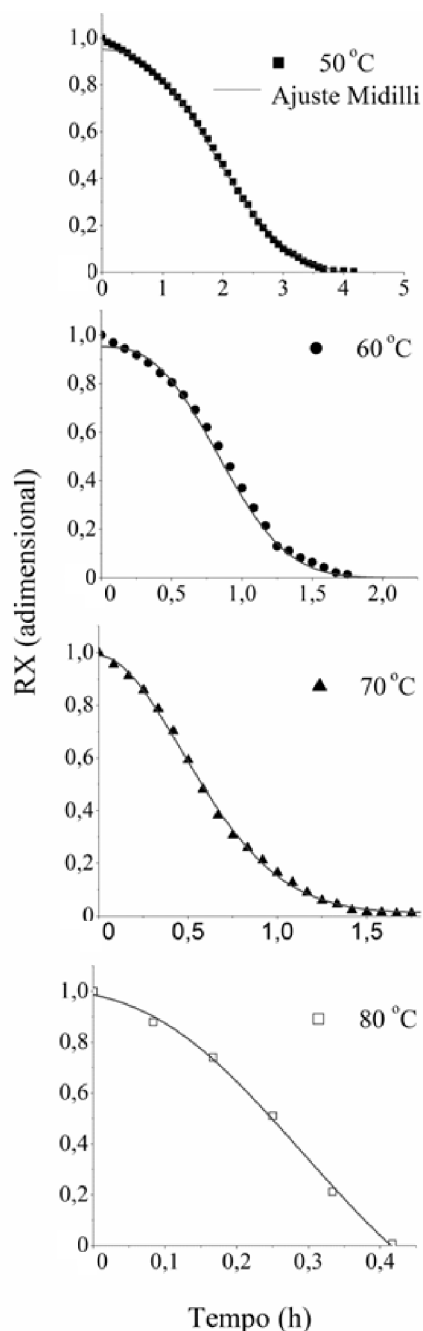
Na Figura 2 estão plotadas as curvas de secagem feitas na estufa nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

Nota-se que os valores da difusividade efetiva aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, conforme Tabela 3,

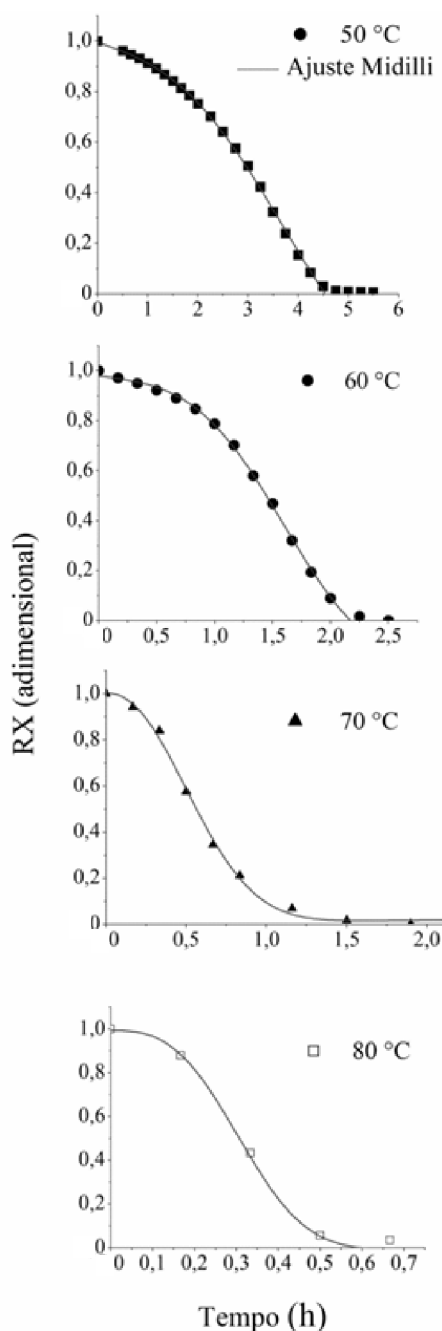
tanto para o infravermelho quanto para a estufa. Almeida et al. (2009) secaram grãos de feijão da variedade Adzuki na faixa de temperatura de 30 a 70 °C e obtiveram coeficientes de difusão na faixa de  $0,510 \cdot 10^{-10}$  a  $2,230 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , sendo o menor valor para a temperatura de 30 °C e o maior valor para a temperatura de 70 °C.

Reis et al. (2011) secaram pimenta de cumarí do Pará e perceberam que o  $D_{ef}$  aumenta com o aumento da temperatura. Barbosa et al. (2007) secaram folhas de erva-cidreira-brasileira e encontraram valores de  $2,91 \cdot 10^{-12}$ ,  $5,23 \cdot 10^{-12}$ ,  $7,14 \cdot 10^{-12}$ ,  $1010 \cdot 10^{-12}$  e  $11,71 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente, o que ratifica que a difusividade eficaz aumentou sempre que a temperatura do ar de secagem também aumentou mostrando, assim, uma redução na resistência interna de secagem como aumento da temperatura. Os trabalhos citados acima confirmam o comportamento da difusividade das folhas de manjeriço.

Para verificar a uniformidade de variação da difusividade com a temperatura na forma de “ $\ln D_{ef}$ ” apresenta-se a Figura 3, descritos em função do recíproco da temperatura absoluta



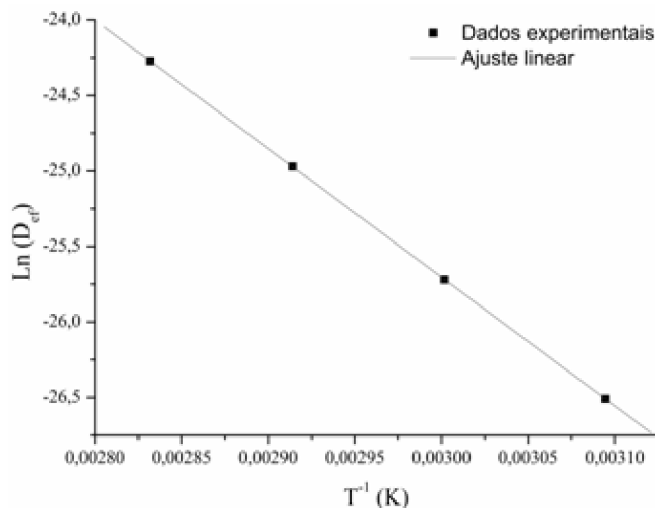
**Figura 1.** Ajuste do modelo de Midilli et al. (2002) aos dados experimentais de secagem de folhas de *Ocimum basilicum* L. a diferentes temperaturas de secagem em secador infravermelho



**Figura 2.** Ajuste do modelo de Midilli et al. (2002) aos dados de secagem de folhas de *Ocimum basilicum* L. a diferentes temperaturas de secagem em estufa com circulação de ar

**Tabela 3.** Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) obtidos para folhas de *Ocimum basilicum* L. em diferentes temperaturas do ar de secagem por meio de estufa com circulação de ar e infravermelho

Meio de secagem	Temperatura (°C)	$D_{ef}$ ( $m^2 s^{-1}$ )	$R^2$	SE (adimensional)	P (%)	$\chi^2$ (decimal)
Estufa	50	$1,95 \cdot 10^{-12}$	0,7991	0,11	9,88	$1,2 \cdot 10^{-2}$
	60	$4,43 \cdot 10^{-12}$	0,7874	0,10	8,12	0,01
	70	$1,54 \cdot 10^{-11}$	0,8115	0,08	5,74	$6,4 \cdot 10^{-3}$
	80	$2,83 \cdot 10^{-11}$	0,8608	0,09	9,20	$8,110^{-3}$
Infravermelho	50	$4,19 \cdot 10^{-12}$	0,8661	0,10	15,15	0,01
	60	$9,10 \cdot 10^{-12}$	0,8841	0,11	18,84	$1,2 \cdot 10^{-2}$
	70	$2,92 \cdot 10^{-11}$	0,8675	0,11	14,59	$1,2 \cdot 10^{-2}$
	80	$1,32 \cdot 10^{-11}$	0,9280	0,09	17,91	$8,110^{-3}$



**Figura 3.** Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva média das secagens em secador infravermelho e em estufa e a temperatura absoluta na secagem da folhas de *Ocimum basilicum* L.

( $T^{-1}$ ). Para cada temperatura foi realizada a média dos valores de  $D_{ef}$  da secagem em infravermelho e da secagem em estufa.

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação  $E_a R^{-1}$  enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ . A Eq. 15 mostra os coeficientes da equação ajustados para o coeficiente de difusão efetivo do manjeriço, calculados de acordo com a Eq. 14.

$$D_{ef} = -4,47 \cdot 10^{-11} \exp\left(\frac{-70785,40}{RT}\right) \quad (15)$$

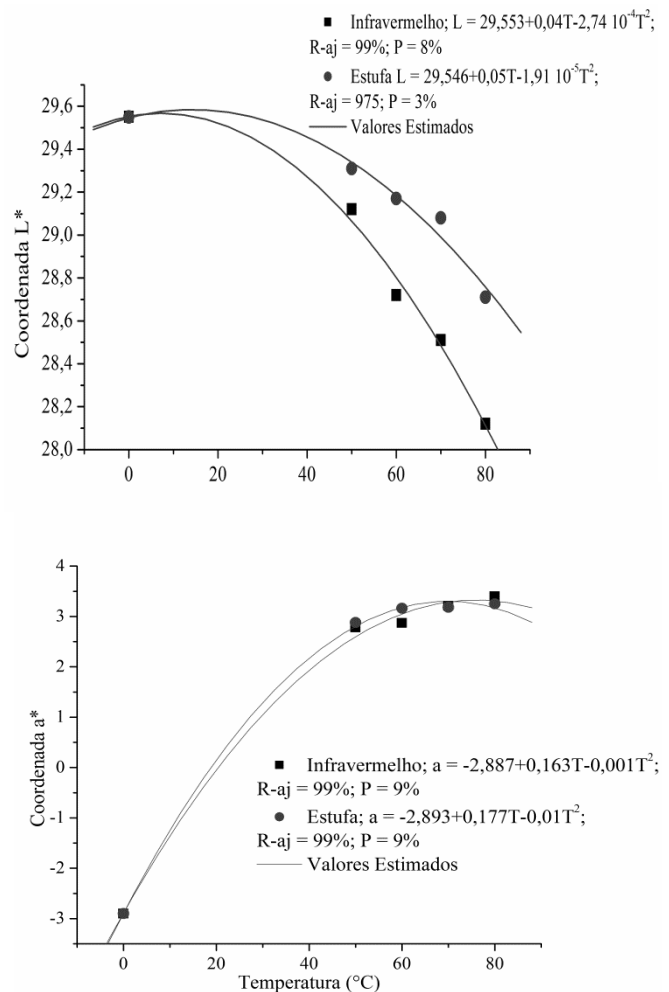
A energia de ativação ( $E_a$ ) calculada da reta obtida na Figura 4 foi de  $70,79 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Kayacier & Singh (2004) e Goneli et al. (2007) relatam que em processos de secagem quanto menor a energia de ativação maior a difusividade de água no produto. Barbosa et al. (2007) estimaram a energia de ativação para folhas de erva-cidreira-brasileira e obtiveram o valor de  $31,79 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Já Doymaz (2006) encontrou, para folhas de *Mentha spicata* L., o valor de  $62,96 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Desta forma, o valor encontrado por esse autor é o que mais se aproxima do resultado encontrado no presente trabalho.

De acordo com Zogzas et al. (1996) para produtos agrícolas o valor para a energia de ativação varia de  $12,7$  até  $110 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Logo, a energia de ativação obtida no presente trabalho se encontra nesta faixa.

Os resultados dos parâmetros de cor,  $L^*$  e  $a^*$  se encontram na Figura 4.

Para as variáveis de cor da Figura 4 a temperatura inicial do gráfico indica que as folhas de manjeriço foram analisadas in natura. Valores estimados pelo modelo polinomial geraram equações de segundo grau, conforme Equações inseridas nos gráficos.

Assim, com o aumento da temperatura a coordenada  $L$  foi diminuindo polinomialmente indicando que houve escurecimento da amostra em maiores temperaturas. Na secagem em estufa maiores valores de  $L$  foram obtidos em



**Figura 4.** Valores experimentais e estimados da coordenada  $L^*$ ; valores experimentais e estimados da coordenada  $a^*$  das folhas de manjeriço in natura e secadas a  $50, 60, 70$  e  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  em infravermelho e estufa

relação ao infravermelho. Martinazzo et al. (2008) analisaram folhas de capim limão armazenadas em embalagens de polietileno e kraft e perceberam que o valor de  $L$  caiu de  $53$  para  $46$ . No presente trabalho o decréscimo também ocorreu o que pode indicar que o processamento de folhas, seja por meio da desidratação ou embalagem, causa escurecimento.

Pela degradação da clorofila a cor passa de verde-brilhante para verde-oliva em alimentos processados (Heaton & Marangoni, 1996). A clorofila é sensível ao pH, enzimas, temperatura, luz e oxigênio, os quais têm maior ou menor influência na sua degradação, de acordo com a atividade de água do meio (Schwartz & Lorenzo, 1990; Bohn & Walczyk, 2004).

A coordenada  $a^*$ , que varia de verde (valores negativos) a vermelho (valores positivos), indica que, com seu aumento polinomial, as folhas com a secagem foram perdendo o pigmento clorofila.

Valduga et al. (2005) constataram influência significativa do tempo de armazenamento na perda da cor verde da erva-mate, em diferentes embalagens, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho.

## CONCLUSÕES

1. O comportamento das curvas de secagem das folhas de manjeriço foi semelhante ao da maioria dos produtos agrícolas; o tempo de secagem no infravermelho foi de 5; 2,5; 1,6 e 0,92 h para as temperaturas de secagem de 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente e na estufa as secagens duraram 5,8; 2,8; 1,8 e 1,2 h respectivamente, para as mesmas temperaturas.

2. O modelo matemático de secagem proposto por Midilli et al. (2002) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

3. O coeficiente de difusão variou de  $9,10 \cdot 10^{-12}$  a  $2,92 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

4. A cor das amostras foi altamente influenciada pela secagem em estufa e infravermelho, tornando-se mais escura devido à perda de clorofila com o aumento da temperatura.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudo.

## LITERATURA CITADA

- Almeida, D. P.; Resende, O.; Costa, L. M.; Mendes, U. C.; Sal, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Global Science Technology*, v.2, p.72-83, 2009.
- Barbosa, F. da F.; Melo, E. de C.; Santos, R. H. S.; Rocha, R. P. da; 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, p.73-82, 2007.
- Berbert, P. A.; Queiroz, D. M.; Silva, J. S.; Pinheiro Filho, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.60, p.167-73, 1995.
- Bohn, T.; Walczyk, T. Determination of chlorophyll in plant samples by liquid chromatography using zinc-phthalocyanine as an internal standard. *Journal of Chromatography A*, v.1024, p.123-128, 2004.
- Botelho, F. M.; Corrêa, P. C.; Goneli, A. L. D.; Martins, M. A.; Magalhães, F. E. A.; Campos, S. C. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.845-852, 2011.
- Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para análise de sementes. Brasília: MARA, 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.; 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.
- Costa, L. M.; Resende, O.; Sousa, K. A.; Gonçalves, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.1089-1096, 2011.
- Doymaz, I. Thin-layer drying behavior of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, v.74, p.370-375, 2006.
- Goneli, A. L.; Corrêa, 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.
- Heaton, J. W.; Marangoni, A. G. Chlorophyll degradation in processed foods and senescent plant tissues. *Trends in Food Science and Technology*, v.7, p.8-15, 1996.
- Loughrin, J. H.; Kasperbauer, M. J. L. Light reflected from colored mulches affects aroma and phenolic content of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v.49, p.1331-1335, 2001.
- Kashani-Nejad, M. A.; Mortazavi, A.; Safekordi, A. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, v.78, p.98-108, 2007.
- Kayacier, A.; Singh, R. K. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. *Swiss Society of Food Science and Technology*, v.37, p.275-281, 2004.
- Martinazzo, A. P.; Corrêa, P. C.; Melo, E. de C.; Carneiro, A. P. S. Avaliação colorimétrica de folhas secas de *Cymbopogon citratus* durante o armazenamento. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.10, p.131-140, 2008.
- 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.
- 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.
- Molina Filho, L.; Pedro, M. A. M.; Telis-Romero, J.; Barbosa, S. H. R. Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.26, p.453-458, 2006.
- Oliveira, R. A.; Oliveira, W. P.; Park, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.181-189, 2006.
- 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.14, p.347-353, 2011.
- Salagnac, P.; Glouannec, P.; Lecharpentier, D. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwave heating. *International Journal of heat and mass transfer*, v.47, p.4479-4489, 2004.
- Schwartz, S. J.; Lorenzo, T. V. Chlorophylls in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v.29, p.1-17, 1990.
- Valduga, E.; Javornik, G.; Sordi, M.; Rezende, D. F. Avaliação das características de qualidade da erva-mate (chimarrão) acondicionada em diferentes embalagens. *Brazilian Journal of Food Technology*, v.8, p.99-105, 2005.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, v.14, p.2225-2253, 1996.