



Determinação e modelagem matemática da secagem de hortelã e do tempo de meia resposta.

KEDINNA D. SOUSA (IC)^{1*}, SAMUEL A. A. DIAS (IC)¹, KARINA R. FONSECA (IC)¹, IVANO A. DEVILLA (PQ)²

¹ Graduação em Engenharia Agrícola, Campus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás, samueldiasabreu@gmail.com

² Docente do Curso de Graduação em Engenharia Agrícola, Campus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas - UEG, Anápolis (GO)

Resumo: O cultivo e a importância de plantas aromáticas e medicinais vêm crescendo com o passar do tempo no mundo, com base, em especial, na demanda criada pelas indústrias. Conhecer as propriedades nos processos de secagem de produtos agrícolas é uma fonte de informação importante para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida neste processo e estudar os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos agrícolas. Amostras de folhas de hortelã foram secas em secador de camada fina nas temperaturas de 30, 35, 40 °C. Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais obtidos na secagem destes produtos, utilizando o programa Statistica 12.0. O melhor modelo de secagem foi selecionado utilizando o R^2 , P, SE e X2. Utilizando-se o melhor modelo para prever a cinética de secagem, foram estimados os tempos de meia resposta (H) em função da temperatura de secagem e do teor de água inicial do hortelã. Os melhores modelos foram: para a temperatura de 30°C, Page e Midilli; para a temperatura de 35°C, Henderson e Pabis modificada, aproximação da difusão e Midilli; e para a temperatura de 40°C, Henderson e Pabis modificada, Logarítmico e Midilli.

Palavras-chave: *Mentha piperita* L. Plantas aromáticas. Temperatura. Teor de água. Cinética de secagem.

Introdução

A *Mentha piperita* L. pertence à família *Lamiaceae* (Labiatae) sendo conhecida por hortelã-pimenta, menta, menta-inglesa, menta-apimentada, mentadas-cozinhas, menta-inglesa ou sândalo segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária [ANVISA], (2010).

O cultivo e a importância de plantas aromáticas e medicinais vêm crescendo com o passar do tempo no mundo, com base, em especial, na demanda criada pelas indústrias (PARREIRAS, 2014). Devido a esta demanda acaba se tornando



essencial, além das práticas agrícolas sustentáveis e mais eficientes, o desenvolvimento de técnicas eficientes de secagem e armazenamento para que a biomassa produzida pela planta e suas propriedades químicas possam ser aproveitadas de forma integral e efetiva (TABALDI et al., 2012).

De acordo com Martinazzo et al. (2013) a secagem e o armazenamento são etapas fundamentais dentre os processos pós-colheita para a obtenção de produtos de qualidade, os quais são a base para a fabricação de medicamentos fitoterápicos. A secagem é um processo que pode demorar desde algumas horas até vários dias dependendo de alguns fatores como: método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (Dalpasquale & Sperandio, 2010).

Devido à importância da secagem de plantas medicinais, considerando-se a necessária conservação pós-colheita do produto, bem como a baixa capacidade de processamento de plantas úmidas, em quantidades exigidas para a produção industrial, a cinética de secagem de plantas medicinais tem sido estudada por diversos pesquisadores, para as mais diferentes espécies (Oliveira et al. 2013).

De acordo com Resende et al. (2008), as curvas de secagem variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas.

Diante do exposto e reconhecendo a real importância da secagem de plantas medicinais, no que diz respeito à manutenção da qualidade do produto durante o armazenamento e a inviabilidade da utilização das plantas *in natura* pela indústria farmacêutica, vários pesquisadores vêm estudando a influência da secagem em diferentes espécies medicinais (MARTINS et al., 2012).

Conhecer as propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é uma fonte de informação importante para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida neste processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos agrícolas (Corrêa et al., 2010).

Em face do exposto este trabalho visa determinar e modelar a cinética de secagem para a hortelã (*Mentha piperita* L) em três diferentes temperaturas (30, 35 e 40°C), com os teores de água iniciais de 13%, 26%, 42%, 62% e 78% b.u., selecionar os melhores modelos que se ajustaram a estas curvas, e determinar e modelar o tempo de meia resposta das folhas de hortelã.

Material e Métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Secagem e Armazenagem de Produtos Vegetais do Campus de Ciências Exatas e Tecnológicas – Henrique Santillo, da Universidade Estadual de Goiás, em Anápolis- Goiás.

As folhas de hortelã (*Mentha piperita* L.) foram colhidas na cidade de Anápolis, Goiás, nas primeiras horas da manhã após não haver mais orvalho sobre suas superfícies. Na época de coleta das folhas não foi realizada a irrigação nem foram coletadas folhas após precipitações pluviométricas visando evitar variações no seu teor de água inicial. A coleta foi realizada de modo aleatório; posteriormente foram selecionadas folhas com ausência de partes danificadas e homogeneizadas com a finalidade de evitar qualquer tipo de interferência nos resultados.

As amostras de hortelã, *in natura*, foram transportadas em sacos de polipropileno à temperatura ambiente para o laboratório.

O delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), sendo os tratamentos as temperaturas de 30, 35 e 40°C em quatro repetições, foi adotado para avaliação dos resultados.

O teor de água inicial do hortelã foi determinado de acordo com a norma analítica de BRASIL (2009), em estufa a 105°C até peso constante, em três repetições.

As amostras foram secas em estufa com circulação de ar nas temperaturas de 30, 35, 40°C. Os dados obtidos na secagem destes produtos foram ajustados aos modelos de cinética de secagem, Tabela 1, utilizando-se um software de análises estatísticas.

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a cinética de secagem de produtos agrícolas.

Designação do Modelo	Modelo	
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t)$	Aproximação da Difusão	(4)
$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Dois Termos	(5)
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t)$	Exponencial de Dois Termos	(6)
$RU = a \exp(-k t)$	Henderson e Pabis	(7)
$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	Henderson e Pabis Modificada	(8)
$RU = a \exp(-k t) + c$	Logarítmico	(9)
$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	Midilli	(10)
$RU = \exp(-k t)$	Newton	(11)
$RU = \exp(-k t^n)$	Page	(12)
$RU = \exp((-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}) / 2 b)$	Thompson	(13)
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t)$	Verma	(14)
$RU = 1 + a t + b t^2$	Wang e Singh	(15)

RU - razão de teor de água do produto, adimensional; t - tempo de secagem, h; k, k₀, k₁ - constantes de secagem, h⁻¹, e a, b, c, n - coeficientes dos modelos.

A razão de umidade foi estimada pela equação abaixo.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (16)$$

Em que: RU – razão de teor de água do produto, adimensional; U – teor de água do produto, decimal b.s.; U_i – teor de água inicial do produto, decimal b.s.; e U_e – teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

O melhor modelo para traçar as curvas de secagem de hortelã foi selecionado utilizando-se os valores de Erro relativo (P), coeficiente de determinação ajustado (R²), erro médio estimado (SE), teste do qui-quadrado (X²), equações 17, 18 e 19.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (17)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (18)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR} \quad (19)$$

Em que: Y – valor experimental; Y_0 – valor estimado pelo modelo; n – número de observações experimentais; e GLR – número de graus de liberdade do modelo.

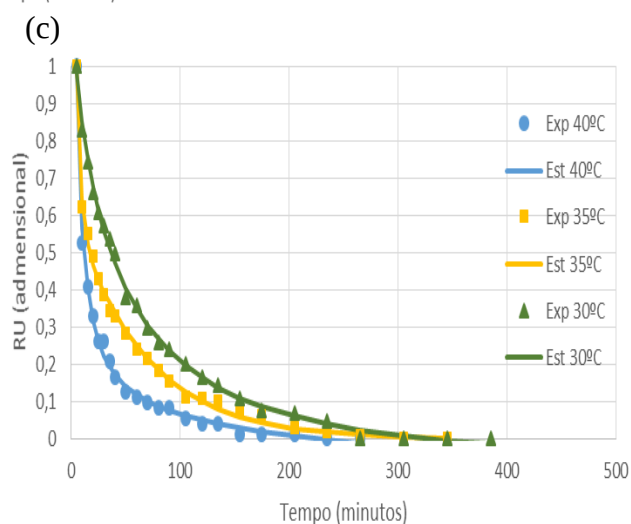
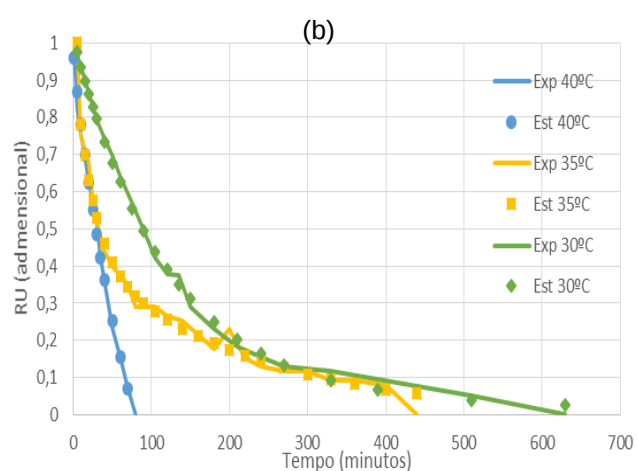
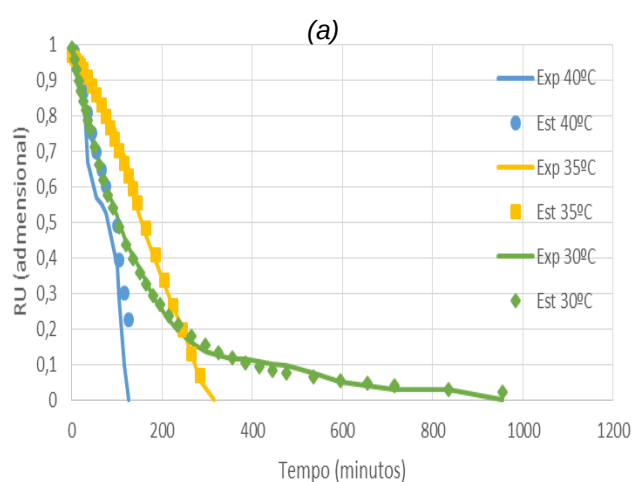
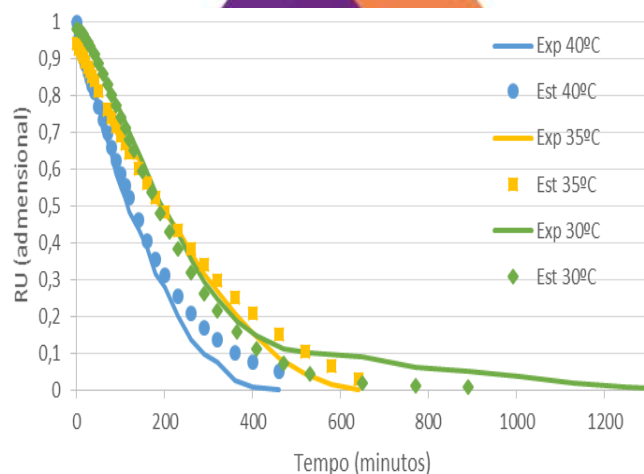
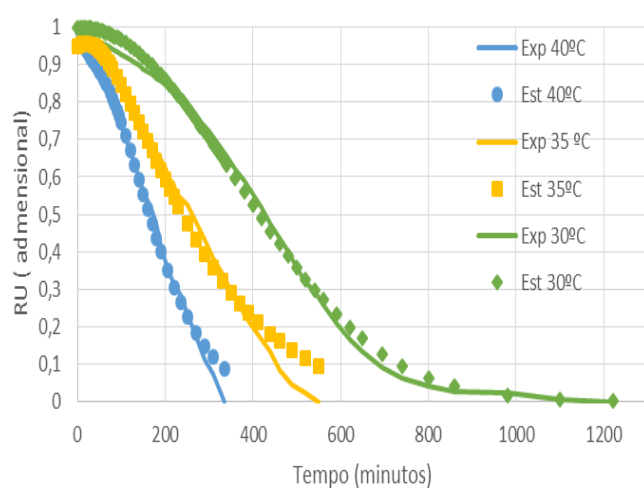
O critério de seleção dos estimadores estatísticos foram R^2 próximo de 100%, $P < 10\%$, SE e χ^2 próximos de zero (MADAMBA et al., 1996).

Utilizando-se o melhor modelo para prever a cinética de secagem, foram estimados os tempos de meia resposta (H) em função da temperatura de secagem e do teor de água inicial do hortelã. Aos dados experimentais de tempo de meia resposta foram ajustados o modelo linear de regressão.

Resultados e Discussão

Na Figura 1 estão plotadas as curvas de secagem de folhas de hortelã nas diferentes temperaturas estudadas e nos teores de água: a) Teor de água de 80% b.u.; b) Teor de água de 62% b.u.; c) Teor de água de 42% b.u.; d) Teor de água de 26% b.u.; e) Teor de água de 13% b.u. Verifica-se que com o aumento da temperatura de secagem o tempo de secagem diminuiu para todos teores de água iniciais estudados. Já com a elevação do teor de água inicial das amostras o tempo de secagem aumentou.

Na Tabela 2 são mostrados o melhor modelo de secagem, R^2 , P , SE e χ^2 para as temperaturas e teores de água iniciais estudados neste trabalho. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais de secagem, ou seja que obtiveram os valores que mais se aproximaram do que foi previsto por Madamba (1996), R^2 próximo de 1, $P < 10\%$, SE e χ^2 próximos de zero, foram: a) para a temperatura de 30°C os modelos de Page, para a umidade de campo (78% b.u.), o modelo de Midilli para as umidades de 62; 26 e 13% b.u., e Henderson e Pabis modificada para a umidade de 42% b.u.; b) para a temperatura de 35°C os modelos que melhor se ajustaram foram os de Henderson e Pabis modificada para as umidades de 78%, 42%, 26% e 13% b.u., e Midilli para a umidade de 62% b.u.; e c) para a temperatura de 40°C os melhores modelos foram os de Henderson e Pabis modificada para as umidades de 78% e 62% b.u., Midilli para as umidades de 42% e 13% b.u., e o modelo Logarítmico para a umidade de 26% b.u.



(e)

Figura 1 – Curvas de secagem estimadas (Est) e experimentais (Exp) nas temperaturas de 30, 35 e 40°C. nos teores de água de a) Teor de água de 80% b.u.; b) Teor de água de 62% b.u.; c) Teor de água de 42% b.u.; d) Teor de água de 26% b.u.; e) Teor de água de 13% b.u.

Tabela 2 – Modelo de secagem, R^2 (decimal), P(%), SE (decimal), X^2 (decimal) para as temperaturas de 40, 35 e 30 °C e para os teores de água iniciais de 13%, 26%, 42%, 62% e 78%b.u.

Temperatura 40 °C					
Teor de água (% b.u.)					
	78	62	42	26	13
Modelo	Henderson e Pabis modificada	Henderson e Pabis modificada	Midilli	Logarítmico	Midilli
R^2	0,998	0,999	0,996	0,997	0,998
P	4,641	8,650	9,789	3,280	6,491
Se	0,080	0,060	0,132	0,070	0,004
X^2	0,006	0,003	0,017	0,004	0,004
Temperatura 35°C					
Teor de água (% b.u.)					
	78	62	42	26	13
Modelo	Henderson e Pabis modificada	Midilli	Henderson e Pabis modificada	Henderson e Pabis Modificada	Henderson e Pabis Modificada
R^2	0,999	0,998	0,998	0,996	0,997
P	0,989	8,017	3,209	5,847	6,696
Se	0,038	0,109	0,083	0,113	0,093
X^2	0,001	0,012	0,007	0,013	0,009
Temperatura 30°C					
Teor de água (% b.u.)					
	78	62	42	26	13
	Page	Midilli	Henderson e Pabis modificada	Midilli	Midilli
R^2	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
P	0,989	4,061	5,454	5,908	4,254
Se	0,038	0,044	0,066	0,075	0,062
X^2	0,001	0,002	0,004	0,006	0,004

A Tabela 3 mostra os valores do tempo de meia resposta (H) para as temperaturas e teores de água avaliados. Nota-se que o tempo de meia resposta é inversamente proporcional aumento da temperatura de secagem.

Verifica-se também, na Tabela 3, que o tempo de meia resposta é diretamente proporcional ao aumento do teor de água.

TABELA 3 – Valores de tempo de meia resposta (H) para as temperaturas e teores de água avaliados.

Teor de água (%b.u.)	RU	H (minutos)		
		30°C	35°C	40°C
87	0,50000	428,24	260,69	172,44
	0,25000	541,33	354,79	238,99
	0,12500	659,09	443,88	286,12
	0,06250	741,85	477,49	302,42
	0,03125	848,15	508,58	324,21
62	0,50000	194,09	188,91	115,80
	0,25000	319,61	305,03	192,88
	0,12500	450,23	427,11	270,18
	0,06250	769,25	494,66	330,54
	0,03125	1052,98	546,20	355,07
42	0,50000	104,97	90,24	79,38
	0,25000	187,74	122,32	106,37
	0,12500	330,68	137,54	113,58
	0,06250	568,16	141,27	118,65
	0,03125	719,68	143,14	121,82
26	0,50000	89,71	32,34	31,13
	0,25000	161,10	122,39	46,80
	0,12500	294,20	249,43	63,29
	0,06250	483,81	408,43	71,32
	0,03125	558,92	424,21	75,66
13	0,50000	39,59	19,23	11,15
	0,25000	77,93	56,07	27,29
	0,12500	145,93	100,79	50,50
	0,06250	214,55	173,79	101,60
	0,03125	245,94	203,71	142,78

A equação do tempo de meia resposta ajustada para os valores experimentais é mostrada a seguir.

$$H = \exp(3,67103 + 0,057635 \cdot U - 0,00742 \cdot T - 0,00092 \cdot U \cdot T) \quad R^2 = 0,9861 \quad (20)$$



Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que: (a) os melhores modelos matemáticos foram, para a temperatura de 30°C, Page (78% b.u.), Midilli (62% 26% e 13% b.u.) e Henderson e Pabis modificada (42% b.u.); para a temperatura de 35°C, Henderson e Pabis modificada (78%, 42%, 26% e 13% b.u.) e Midilli (62% b.u.); e para a temperatura de 40°C, Henderson e Pabis modificada (78% e 62% b.u.), Logarítmico (26% b.u.) e Midilli (42% e 13% b.u.). (b) Os tempos de meia resposta (H) apresentam comportamento inversamente proporcional ao aumento da temperatura de secagem e comportamento diretamente proporcional ao aumento do teor de água.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Goiás e ao Cnpq pelo apoio financeiro, por meio da bolsa PIBIT/CNPq.

Referências

- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2010). **Farmacopéia Brasileira** (v.2, 904p). Brasília: ANVISA.
- Corrêa, P. C.; Oliveira, G. H. H.; Botelho, F. M.; Goneli, A. L. D.; Carvalho, F. M. **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem**. Revista Ceres, v.57, p.595-601, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005>
- Dalpasquale, V. A.; Sperandio, D. **Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante**. Engenharia Agrícola, v.30, p.726-731, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000400016>.
- 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.
- MARTINAZZO, A. P., MELO, E. C., DEMUNER, A. J., BERBERT, P. A. 2013. **Avaliação do óleo essencial folhas de Cymbopogon citratus (DC.) Stapf após o processo de secagem**. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 12, 115-122.
- PINHO, L. de; SOUZA, P. N. S.; SOBRINHO E. M.; ALMEIDA, A. C. de; MARTINS, E. R. **Atividade antimicrobiana de extratos hidroalcoolicos das folhas de alecrim- pimenta, aroeira, barbatimão, erva baleeira e do farelo da casca de pequi**. Ciência Rural. ISSN 0103-8478. 2012. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/cr/2012nahead/a3312cr5470.pdf>>.

REALIZAÇÃO





OLIVEIRA, M. T. R. et al. **Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip.** Revista Brasileira de Plantas Medicinais, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2013.

PARREIRAS, N. S. **Nitrogênio e fósforo no crescimento, nutrição, produção de óleo essencial e anatomia foliar de *Lippia origanoides*.** 2014. 53 f. Universidade Estadual de Santa Cruz - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Ilhéus.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. **Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.10, n.1, p.17-26, 2008.

TABALDI, L. A.; VIEIRA, M. C.; ZÁRATE, N. A. H.; SILVA, L. R.; GONÇALVES, W. L. F.; PILECCO, M.; FORMAGIO, A. S. N.; GASSI, R. P.; PADOVAN, M. P. **Cover crops and their effects on the biomass yield of *Serjania marginata* plants.** Ciência Rural, v.42, p.614-620, 2012.

REALIZAÇÃO

PRG
Pró-Reitoria de
Graduação

PRP
Pró-Reitoria de
Pesquisa e
Pós-Graduação

PRE
Pró-Reitoria de
Extensão, Cultura e
Assuntos Estudantis



Universidade
Estadual de Goiás