



Determinação e modelagem matemática da secagem de arroz e do tempo de meia resposta

SAMUEL A. A. DIAS* (IC)¹, KARINA R. FONSECA (IC)¹, KEDINNA D. SOUSA (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)

O presente trabalho teve como objetivo estudar as curvas de secagem do arroz basmati em diferentes temperaturas e umidades, e obter os tempos de meia resposta de cada um dos tratamentos, o teor de água inicial foi determinado pela norma analítica, e as temperaturas usadas foram as de 30°C, 40°C e 50°C para as umidades de 14%, 16%, 18% e 22% b.u. Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais de secagem, sendo realizados pela regressão não linear, pelo método de Gauss Newton, onde foi usado o programa Statistica 12.0. Onde as curvas foram ajustadas e os melhores modelos foram o de Midilli e Henderson e Pabis modificada, já os tempos de meia resposta foi possível observar a diminuição do tempo de meia resposta com o aumento das temperaturas e redução das umidades.

Palavras-chave: Arroz aromatizado. Coeficiente de difusão. Modelo de Hukill. Cinética de Secagem.

Introdução

O arroz é um dos alimentos mais consumidos hoje em dia chegando a ser o terceiro alimento mais produzindo e cultivado do mundo (FAO 2015). Possuindo apenas duas espécies cultivadas que são a *Oryza sativa* L que é conhecido como o arroz asiático e *Oryza glaberrima* o arroz africano, contendo 25 espécies pertencentes ao gênero *Oryza* (VAUGHAN et al., 2003).

Sendo o arroz (*Oryza sativa* L.) um dos cereais mais amplamente cultivados no mundo, é alimento básico para cerca de metade da população do mundial, em particular para os países asiáticos e africanos. Já no Brasil, a estimativa para a área plantada na safra 2016/2017 é cerca de 2 milhões de hectares (CONAB 2017).

A secagem de alimentos, é um processo de aplicação de calor sob condições controladas a fim de remover grande parte da água livre presente no alimento pela



evaporação. Visa aumentar a vida de prateleira por reduzir sua atividade de água, e também apresenta uma vantagem econômica associada à operação de secagem, como consequência da redução de massa e volume do alimento pela retirada da água, tem-se menores custos de transporte e armazenamento (MARCINKOWSKI, 2017).

A simulação do processo de secagem possibilita a previsão, o dimensionamento de secadores, bem como o planejamento do processo. Assim profissionais ligados à atividade, como engenheiros projetistas, pesquisadores, administradores ou produtores, prever o processo de secagem para as condições próprias de uma região, qual o melhor tipo de secador e quais as condições específicas de secagem, além do tempo necessário para realizá-la.

No processo de simulação utilizam-se modelos matemáticos, como por exemplo o de Hukill, Equações 1, 2 e 3.

$$RU = \frac{2^D}{2^D - 2^Y - 1} \quad (1)$$

Em que,

RU = razão de umidade do produto;

D = adimensional de profundidade; e

Y= adimensional de tempo.

Os adimensionais de tempo e de profundidade podem serem estimados pelas equações abaixo:

Os adimensionais de tempo e de profundidade podem serem estimados pelas equações:

$$Y = \frac{t}{H} \quad (2)$$

$$D = \frac{MS}{A.W} \quad (3)$$

Em que: t = tempo decorrido após o início da secagem; H = tempo de meia resposta; MS= massa de matéria seca; A= área de secagem; e W= massa específica da matéria seca.

Este trabalho tem como objetivo determinar e modelar a cinética de secagem para o arroz aromático em três diferentes temperaturas (30, 40 e 50°C), com os teores de água iniciais de 22%, 18%, 16% e 14%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

Foram utilizados grãos de arroz fornecidos pela Embrapa Arroz e Feijão, localizada em Santo Antônio de Goiás. As amostras foram secas em secador de camada fina nas temperaturas de 30, 40 e 50 °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 predizer a cinética de secagem de produtos agrícolas.

Designação do Modelo	Modelo	
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_b t)$	Aproximação da Difusão	(4)
$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Dois Termos	(5)
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_a t)$	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, k_0 , k_1 - constantes de secagem, h^{-1} , e a, b, c, n - coeficientes dos modelos.

A razão de umidade foi estimada pela abaixo.

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



Em que: RU - razão de umidade 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 do arroz foi selecionado utilizando-se os valores do erro relativo (P), erro médio estimado (SE), teste do qui-quadrado (X^2), e o coeficiente de determinação ajustado (R^2). O critério de seleção dos estimadores estatísticos foi R^2 próximo de 100%, $P < 10\%$, SE e X^2 próximos de zero (MADAMBA et al., 1996). Nas tabelas dos coeficientes de avaliação dos modelos (P, SE, X^2 , R^2) foram colocados apenas os 3 melhores modelos para cada temperatura de cada modelo, e nas tabelas que apresentam os coeficientes de cada modelo foram apresentados apenas os coeficientes do melhor modelo para suas respectivas temperaturas para as cultivares.

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

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

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

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 foi R^2 próximo de 1, $P < 10\%$, SE e X^2 próximos de zero (MADAMBA et al., 1996).

Utilizando-se o melhor modelo para prever a cinética de secagem, foram estimados os tempos de meio resposta (H) em função da temperatura de secagem e do teor de água inicial do arroz.



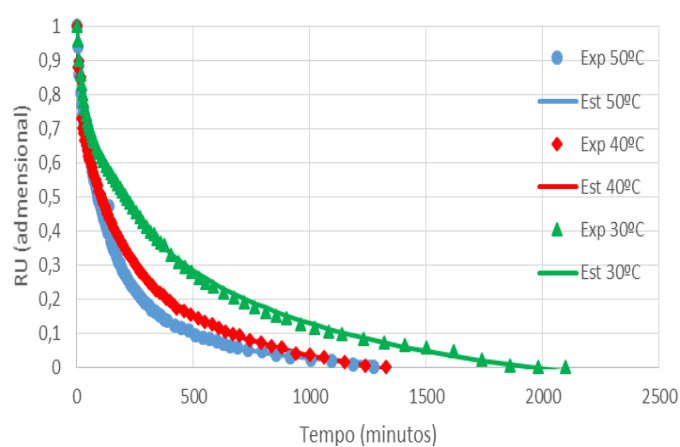
Resultados e Discussão

A Figura 1 representa os gráficos com as curvas de secagem das diferentes temperaturas e teores de água onde: a) Teor de água de 22% b.u. b) Teor de água de 18% b.u. c) Teor de água de 16% b.u. d) Teor de água de 14% b.u. Observa-se que com o aumento das temperaturas de secagem houve uma diminuição do tempo de secagem, e o aumento da umidade inicial acarretou em um aumento do tempo de secagem.

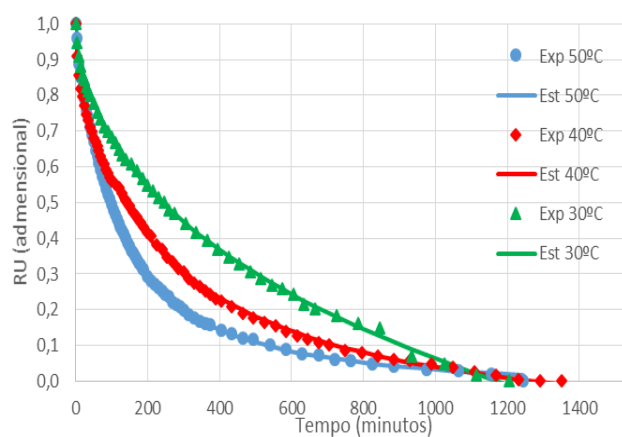
Na Tabela 2 estão representados os modelos matemáticos que melhor se ajustaram as curvas de secagem e os devidos coeficientes R^2 , P, SE e X^2 , para as temperaturas e umidades estudadas. a) Para a temperatura de secagem de 30°C o modelo predominante foi o de Midilli, sendo o melhor modelo para as umidades de 22%, 18% e 16%, e para a umidade de 14% o melhor modelo foi o de Henderson e Pabis modificada. b) Para a temperatura de 40°C ocorreu da mesma forma da curva de 30°C, sendo Midilli o melhor modelo para as umidades de 22%, 18%, 16% e para 14% de umidade o melhor modelo foi o de Henderson e Pabis modificada. c) Para a temperatura de 50°C os melhores modelos foram o de Henderson e Pabis modificada para as umidades de 22% e 18%, e Midilli para as umidades de 16% e 14%.

REALIZAÇÃO

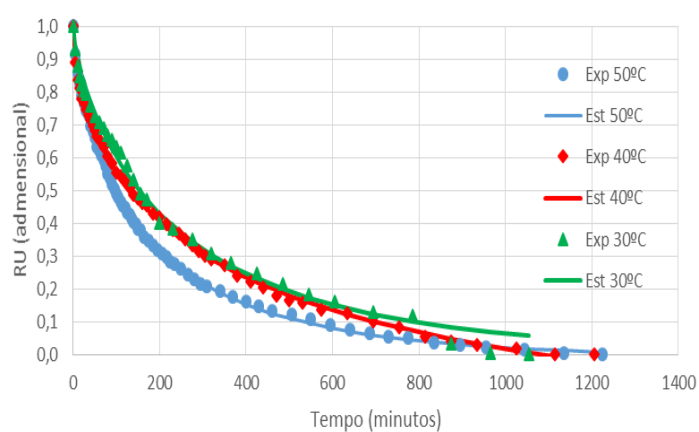




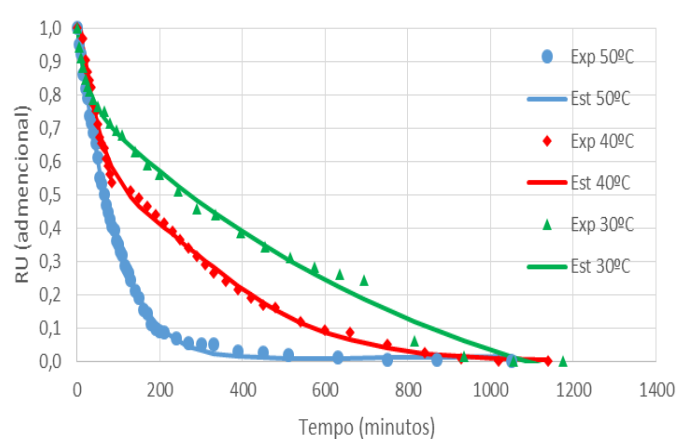
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1 – Curvas de secagem estimadas (Est) e experimentais (Exp) nas temperaturas de 30, 40 e 50°C. Nos teores de água de a) Teor de água de 22% b.u.; b) Teor de água de 18% b.u.; c) Teor de água de 16% b.u.; d) Teor de água de 14% b.u.

Tabela 2 – Valores do erro relativo (P), coeficiente de determinação ajustado (R^2), erro médio estimado (SE), teste do qui-quadrado (X^2) para o melhor modelo de secagem que melhor se ajustou para as temperaturas de 30°C, 40°C e 50°C para as umidades de 14%, 16%, 18% e 22%.

Temperatura 30°C				
Teor de água (% b.u.)				
	22	18	16	14
Modelo	Midilli	Midilli	Midilli	Henderson e Pabis Modificada
R^2	0,998	0,999	0,997	0,997
P	5,025	2,476	4,482	3,143
Se	0,107	0,044	0,106	0,118
X^2	0,011	0,001	0,011	0,013

Temperatura 40°C				
Teor de água (% b.u.)				
	22	18	16	14
Modelo	Midilli	Midilli	Midilli	Henderson e Pabis Modificada
R^2	0,998	0,999	0,999	0,997
P	2,778	6,866	9,750	6,234
Se	0,113	0,076	0,063	0,155
X^2	0,012	0,005	0,004	0,024

Temperatura 50°C				
Teor de água (% b.u.)				
	22	18	16	14
Modelo	Henderson e Pabis Modificada	Henderson e Pabis Modificada	Midilli	Midilli
R^2	0,998	0,999	0,999	0,999
P	2,973	1,004	4,935	9,442
Se	0,096	0,032	0,054	0,075
X^2	0,009	0,001	0,002	0,005

A Tabela 3 apresenta os tempos de meia resposta. Nota-se que quanto maiores as umidades e menores temperaturas maiores foram os tempos de meia resposta.



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

Teor de água (%b.u.)	RU	H (minutos)		
		30°C	40°C	50°C
22	0,50000	250,29	154,29	89,83
	0,25000	588,93	346,29	223,64
	0,12500	972,89	584,18	418,27
	0,06250	1453,44	835,68	658,71
	0,03125	1698,59	1061,70	922,42
18	0,50000	245,80	140,05	89,69
	0,25000	578,21	335,40	199,09
	0,12500	962,64	583,87	346,43
	0,06250	969,10	792,46	520,11
	0,03125	1074,08	989,23	624,38
16	0,50000	151,30	123,48	84,83
	0,25000	417,46	325,14	197,45
	0,12500	738,97	521,08	343,23
	0,06250	845,64	697,67	457,22
	0,03125	887,87	781,45	555,61
14	0,50000	114,35	54,11	51,12
	0,25000	211,14	173,39	114,83
	0,12500	353,07	282,61	156,31
	0,06250	398,86	343,80	182,31
	0,03125	426,93	366,57	222,59

A equação de meia resposta de Hukill, ajustada para os valores experimentais é representada na equação a seguir (equação 20).

$$H = \exp(4,40311 + 0,12250 \cdot U - 0,02151 \cdot T - 0,00130 \cdot U \cdot T) \quad R^2 = 0,9268 \quad (20)$$

Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos pelo programa Statistica 12.0 foi possível concluir que: (a) Os melhores modelos matemáticos foram, para a temperatura de 30°C, Midilli (22%, 18% e 16% b.u.) e Henderson e Pabis modificada (14% b.u.); para a temperatura de 40°C, Midilli (22%, 18% e 16% b.u.) e Henderson e Pabis modificada (14% b.u.); e para a temperatura de 50°C, Henderson e Pabis modificada (22% e 18% b.u.) e Midilli (16% e 14% b.u.). (b) E os tempos de meia resposta (H)



apresentaram um comportamento diretamente proporcional ao aumento do teor de água e comportamento inversamente proporcional ao aumento da temperatura de secagem.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Goiás (UEG) pela oportunidade de participar deste projeto e apoio financeiro oferecido por meio da bolsa, e ao meu orientador Ivano Alessandro Devilla.

Referências

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_01_12_14_17_16_boletim_graos_janeiro_2016.pdf>. Acesso em: 28 jan 2016.

FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations FAOSTAT). **Rice Market monitor.** Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/publications/ricepublications/ricemarketmonitorm/en/>> Acesso em; 18 março 2017.

MADAMBA et al., 1996 P.S. Madamba, R.H. Driscoll, K.A. Buckle **Thin layer drying characteristics of garlic slices** Journal of Food Engineering, 29 (1996), pp. 75–97

MARCINKOWSKI A. E. Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13433/000638112.pdf>> Acesso em 19 março 2017.

VAUGHAN, D. A. **The wild relatives of rice:** a genetic resources handbook. International Rice Research Institute: Manilla, 1994. 137 p.