



## MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM DE ARROZ COM CASCA EM LEITO DE JORRO

**Daiane Ribeiro Dias**<sup>1</sup> – daianedias2301@gmail.com  
**Polyana Gomes de Aguiar**<sup>2</sup> – polyana.eq@gmail.com  
**Isabelle Santos Andrade**<sup>2</sup> – isabelleandrade610@gmail.com  
**João Carlos Gonçalves**<sup>2</sup> – joaocarloseq@gmail.com

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica – Uberlândia, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Campus Montes Claros – Montes Claros, MG, Brasil.

**Resumo.** A secagem em leito de jorro é uma operação unitária que vem ganhando espaço nas pesquisas científicas para a secagem de produtos agrícolas. A operação visa assegurar a qualidade e estabilidade do produto, uma vez que a redução do teor de água do produto reduz a atividade biológica. Neste sentido, este trabalho teve o objetivo de estudar a secagem de grãos de arroz com casca em secador leito de jorro nas temperaturas de 50 e 60 °C e velocidades do ar de secagem de 3,73 e 4,14 m/s e ajustar diferentes modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais para avaliar a capacidade preditiva dos modelos. Como critério de avaliação destes, utilizou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio quadrático médio (DQM). Os resultados mostraram que incrementos na temperatura do ar de secagem resultaram em maior redução de umidade do produto. Entre os modelos ajustados, os de Midilli et al. seguidos pelo de Page e Dois Termos apresentaram uma boa reprodutibilidade do processo de secagem para o arroz com casca com umidade inicial de 22 % em base úmida, pois resultaram em valores de  $R^2$  superiores a 0,9859 e DQM inferiores a 0,018.

**Palavras-chave:** Modelos de secagem, razão de umidade e leito de jorro.

### 1. INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, consistindo como principal alimento para mais da metade da população do planeta (SILVA,

2008). Sua importância é evidenciada, principalmente, em países em desenvolvimento, como os da Ásia, África e América Latina, desempenhando papel estratégico, tanto em nível econômico quanto social (EMBRAPA, 2008).

Assim como na maioria dos cereais, a secagem e o armazenamento do arroz são fatores importantes na cadeia produtiva, representando um fator essencial na qualidade final do produto. A umidade ideal para a colheita do arroz é entre 18 % e 27 % em base úmida (bu), sendo considerada alta. Assim, para sua armazenagem, é necessária a redução do teor de água para uma melhor conservação das suas propriedades físicas e fisiológicas (EMBRAPA, 2013).

Em geral, entende-se por secagem a transferência de água ou qualquer outro líquido contido a um dado material para uma fase gasosa não saturada (FOUST, 2011). O objetivo dessa etapa é reduzir o teor de umidade dos produtos, em especial os alimentos, conseqüentemente, inibir o crescimento microbiano assim como a atividade enzimática, os quais são indesejáveis (GEANKOPLIS, 1998).

Nos processos industriais que envolvem a secagem de produtos, uma das tecnologias mais relevante é a modelagem matemática de processos e equipamentos de secagem, em que o objetivo desse modelo é permitir que o profissional escolha o método mais apropriado de secagem a um determinado produto, assim como a escolha de condições de operações adequadas. O fundamento da modelagem é baseado em ter um sistema de equações matemáticas que representam, de forma significativa, o sistema o qual se deseja modelar, em que a solução dessas equações permite prever os parâmetros do processo de secagem em função do tempo, com referência apenas das condições iniciais, de contorno e simplificações (LIMA, 2017).

O processo de secagem é bastante complexo, envolvendo vários fenômenos de transporte, sendo necessário gerar modelos matemáticos que simulem a secagem com grande realismo físico. Devido a isso, diferentes teorias tentam explicar a cinética de secagem de materiais porosos, com o intuito de descrever o comportamento da umidade, como essa é transferida do interior do sólido para evaporar na superfície e qual mecanismo controla o processo de secagem (MUYTA et.al., 1996 *apud* SANTANA 2011).

Dentre os diversos secadores convectivos utilizados na secagem de grãos, como o arroz, feijão, lentilha e outros, destaca-se o leito de jorro, equipamento que tem por finalidade promover íntimo contato entre fluido e partículas, relativamente grandes, que apresentam fluidização de baixa qualidade (MEDEIROS, 2004).

A principal vantagem do uso do leito de jorro na secagem de grãos se deve à sua característica de boa agitação dos sólidos e um bom contato gás-sólido. Outros fatores que complementam sua preferência em relação a outros tipos de secadores são os baixos investimentos iniciais e o custo operacional. O secador é, portanto, bastante utilizado para secagem de cereais, como também em outros processos, tais como o recobrimento de partículas (FREIRE; SARTORI, 1992 *apud* DUARTE, 2006), secagem de material pastoso, suspensão e dentre outras aplicações (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Assim, o objetivo do trabalho foi estudar a secagem de grãos de arroz com casca em secador leito de jorro nas temperaturas de 50 e 60 °C, em velocidades de 3,73 e 4,14 m/s e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Sistema experimental

O sistema experimental (Figura 1 A) utilizado na condução dos ensaios de secagem consiste em um leito cônico-cilíndrico, sendo suas dimensões representadas na Figura 1 B.

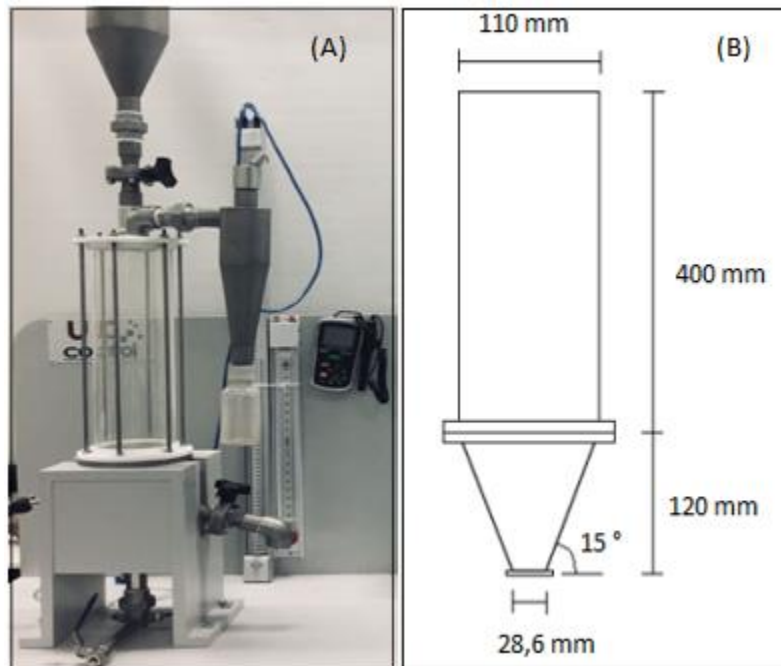


Figura 1 – Unidade experimental (A) e dimensões (B).

## 2.2 Métodos

**Umidificação do arroz em casca:** Para garantir que a massa do arroz não apresentasse umidade prévia, realizou-se a secagem desse em estufa a 105 °C, por 24 horas, para determinação da massa de sólido seco (BRASIL, 2009). O processo de umidificação do arroz foi fundamental para que os ensaios pudessem partir de um mesmo panorama, o qual objetivou atingir o conteúdo de umidade de 22,00 %, em base úmida, assim como 28,20 % em base seca. Esse valor de umidade foi escolhido por estar na faixa de umidade de colheita que, segundo a Embrapa (2013), é de 18,00 % e 27,00 % em base úmida. Os valores citados foram obtidos a partir de amostras de 300 g de arroz isento de umidade, além da medição de 84,6153 g de água. Assim, utilizou-se balança analítica para determinar as massas de sólido seco em um béquer, além da medição da massa de água em uma proveta, adicionados a um saco plástico lacrado e armazenados em um recipiente hermeticamente fechado, em um intervalo mínimo de 24 horas, anterior aos ensaios de secagem.

**Caracterização do arroz:** Três amostras de grãos foram selecionadas ao acaso, contendo 10 sementes cada uma. Foi realizada uma separação manual das impurezas e das sementes danificadas. Procedeu-se à classificação dos grãos por meio das medidas das dimensões, comprimento (L), espessura (E) e largura (W) com um paquímetro digital. O diâmetro equivalente de cada partícula, a esfericidade e o volume do grão foram calculados a partir das dimensões medidas, conforme Tabela 1.

Em uma proveta, adicionou-se uma quantidade conhecida de arroz, verificando-se o volume aparente ocupado e, então, adicionou-se um volume de água pré-definido e anotando o volume final na proveta. A partir desses dados, determinou-se o volume real ocupado pelo arroz, como sendo a diferença entre o volume total e o da água para cálculo da densidade. Com as densidades real e aparente determinou-se a porosidade (Equação 04 descrita na Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades de partículas não esféricas.

Unidade	Expressão	
Diâmetro equivalente	$D_g = (LEW)^{1/3}$	(01)
Esfericidade	$\phi = (LEW)^{1/3} \cdot L^{-1}$	(02)
Volume do grão	$V_g = \pi D^3 / 6$	(03)
Porosidade	$\varepsilon = [1 - (\gamma/\rho_g)] \cdot 100$	(04)

Fonte: Mohsenin (1965, *apud* USTRA, 2005)

**Velocidade de jorro mínimo:** A coluna do leito foi preenchida com uma carga de 384,6153 g de arroz úmido (22 % de umidade em base úmida). A determinação da velocidade de jorro mínimo, foi determinada experimentalmente, variando-se a vazão de ar no leito, até que esse se expandisse. Variou-se a vazão de forma ascendente e descendente, anotando-se a velocidade superficial do gás.

**Processo de secagem e modelagem:** Foi adicionada uma massa de arroz com casca umidificado equivalente a 300 g de sólido seco, sempre na mesma umidade de início, 22 % em base úmida. Alimentou-se o leito já com a vazão de sólidos estabelecidos, em intervalos de tempos pré-estabelecidos anotou-se a umidade e temperatura de saída do ar, queda de pressão e velocidade de entrada do ar de secagem. Os ensaios experimentais foram realizados com o fluido nas temperaturas de 50 e 60 °C e velocidades de 3,73 e 4,14 m/s. Após os processos, a umidade em base seca dos grãos foi determinada, sendo os dados experimentais expressos na forma de razão de água ( $X_r$ ):

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (05)$$

Onde  $X_t$  é a umidade no tempo  $t$ ,  $X_0$  e  $X_e$  a umidade inicial e de equilíbrio, respectivamente, em base seca. O numerador representa a quantidade de água que ainda pode ser removida ou a quantidade de água livre em qualquer tempo, e o denominador representa a quantidade total de água disponível para ser retirada pela secagem. Segundo Bagheri (2013),  $X_e$  é relativamente pequeno comparado a  $X_t$  e a  $X_0$ , então  $X_r$  pode ser simplificado para  $X_r = X_t/X_0$ .

Os modelos de aproximação de Page, Logaritmico, Dois Termos e Midilli et al. (Tabela 2) foram ajustadas aos dados experimentais de secagem utilizando se o software ORIGIN 2018b (versão para estudante). Para determinar o melhor ajuste foram utilizados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o desvio quadrático médio (DQM):

$$DQM = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{r_{pred,i}} - X_{r_{exp,i}})^2 \right]^{1/2} \quad (06)$$

Onde:

$X_{r_{pred,i}}$  é a razão de água predita pelo modelo matemático;

$X_{r_{exp,i}}$  é a razão de água obtida experimentalmente;

$N$  é o número de observações ao longo do experimento.

Todos os experimentos descritos nesse tópico foram realizados em triplicata.

Tabela 2: Modelos matemáticos aplicados para as curvas de secagem.

Nome do modelo	Modelo	
Midilli et al.	$X_r = a \exp(-kt^n) + bt$	(07)
Logaritmo	$X_r = a \exp(-kt) + c$	(08)
Dois termos	$X_r = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1t)$	(09)
Page	$X_r = \exp(-kt^n)$	(10)
Onde $X_r = X_t/X_0$		

Fonte: MEZIANE (2011)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização física do arroz com casca

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios dos parâmetros derivados das dimensões do grão de arroz, densidade e velocidade de jorro mínimo para os grãos com umidade de 22 % em base úmida.

Tabela 2 - Propriedades obtidas das amostras do arroz com casca e velocidade de jorro mínimo.

Diâmetro equivalente $D_g$ (m)	Esfericidade $\phi$	Densidade aparente $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade real $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade $\epsilon$	Velocidade de jorro mínimo $V_{jm}$ (m/s)
0,00412	0,47	586,21	1065,84	45,00	3,46

#### 2.2 Modelagem dos dados de secagem dos grãos de arroz com casca.

Na Tabela 3, encontram-se os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e dos desvios quadráticos médios (DQM) para os modelos de Midilli *et al.*, Logarítmico, Dois Termos e Page, empregados para descrever a cinética de secagem do arroz com casca com umidade inicial de 22 % bu.

Segundo Madamba, Robert e Buckle (1996), um único critério de avaliação entre modelos, como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), não é suficiente para análise de modelos não lineares. Assim, foi realizada uma análise conjunta do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do desvio quadrático médio (DQM) para selecionar com êxito os modelos de secagem mais adequados. Conforme Kucuk, Kilic e Dincer (2014), quanto mais altos forem os valores de  $R^2$  de um modelo em particular, melhor será o modelo para prever o comportamento de secagem dos produtos agrícolas. Semelhantemente, quanto menor o valor do DQM de um determinado modelo, mais adequado é para representar a cinética de secagem do produto em particular.

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,98, indicando, de acordo com Madamba, Robert e Buckle (1996), uma representação satisfatória do processo de secagem, exceto para o modelo de Logaritmo que apresentou valor de  $R^2$  inferior a 0,97 para os quatro tratamentos de dados estudados. Observa-se que o DQM, para todos os experimentos, variou entre 0,0316 e 0,0056. Os valores de  $R^2$  e DQM encontrados corroboram

com outros pesquisadores, Santos e Oliveira (2013), estudando a secagem de arroz-vermelho com casca os quais encontraram valores de  $R^2$  superiores a 0,98 e DQM menores que 0,0333.

Dessa forma, levando-se em conta modelos que representam satisfatoriamente, o processo de secagem dos grãos de arroz com casca, em todas as condições testadas e que satisfaçam os critérios estatísticos de análise ( $R^2$  e DQM), os modelos de Midilli, seguido pelo de Page e Dois Termos são os recomendados entre os testados, para representar o fenômeno da secagem de arroz com casca nas condições de processo utilizadas. Os resultados encontrados também estão de acordo com os obtidos por Santos e Oliveira (2013), que estudaram a cinética de secagem de arroz-vermelho com casca e observaram que os modelos de Midilli, Page e Dois Termos representaram o processo de secagem satisfatoriamente, pois apresentaram  $R^2$  superiores a 0,99 e DQM significativamente, pequenos.

Tabela 3 – Parâmetros dos quatro modelos analisados, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio quadrático médio (DQM) da secagem dos grãos de arroz com casca para  $m_{inical} = 384,6153$  g.

V (m/s)	MODELO	T (°C)	PARÂMETROS							
			a	b	k	n	$k_1$	$R^2$	DQM	
3,73	MIDILLI <i>et al.</i>	50	0,9996	0,0037	0,2264	0,4267		0,9981	0,0063	
		60	0,9996	0,0037	0,2746	0,4114		0,9972	0,0083	
	LOGARÍTMICO	50	0,4496	0,5251	0,2553			0,9628	0,0287	
		60	0,4988	0,4760	0,2874			0,9612	0,0316	
	DOIS TERMOS	50	0,3322	0,6648	0,5733		0,0123	0,9879	0,0160	
		60	0,6158	0,3811	0,6112		0,6112	0,9867	0,0185	
	PAGE	50			0,2474	0,3282		0,9962	0,0090	
		60			0,3000	0,3149		0,9955	0,0107	
	4,14	MIDILLI <i>et al.</i>	50	0,9997	0,0033	0,2126	0,3918		0,9966	0,0076
			60	0,9998	0,0037	0,2841	0,3739		0,9986	0,0056
		LOGARÍTMICO	50	0,4016	0,5762	0,2714			0,9584	0,0265
			60	0,4734	0,5071	0,3331			0,9615	0,0295
DOIS TERMOS		50	0,3028	0,6945	0,6025		0,0099	0,9859	0,0154	
		60	0,3771	0,6208	0,6564		0,0113	0,9895	0,0155	
PAGE		50			0,2303	0,3018		0,9954	0,0088	
		60			0,3101	0,2775		0,9963	0,0091	

Os resultados da Tabela 3 mostram que a magnitude da constante de secagem (k) aumenta proporcionalmente à temperatura do ar de secagem para todos os modelos. Esse fato é condizente com a literatura, pois, de acordo com Goneli *et al.* (2009) e Madamba, Robert e Buckle (1996), a constante (k) representa o efeito das condições externas de secagem e tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de processo, sendo que está relacionada à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente e à difusão líquida que controla o processo. Comportamento semelhante também foi observado por Santos e Oliveira (2013), no estudo da cinética de secagem de grãos de arroz-vermelho.

Com relação ao coeficiente (n) dos modelos de Page e Midilli, observou-se que há uma tendência de diminuir sua magnitude com o aumento da temperatura. Essa observação também é corroborada pela literatura, pois, segundo Silva (2014), com a elevação da temperatura do ar

de secagem, menor deve ser o valor de  $n$ , uma vez que há maior diferença entre a pressão de vapor do ar e do grão, promovendo maior remoção de água. Segundo Silva (2016), os parâmetros  $a$  e  $b$  não possuem significado físico no processo de secagem, visto que são constantes dos modelos.

Nas Figuras 2 e 3, estão representadas as curvas de secagem dos grãos de arroz com casca estimadas pelos modelos de Midilli *et al.* (Eq. 07), Logarítmico (Eq. 08), Dois Termos (Eq. 09) e Page (Eq. 10). Verifica-se o melhor ajuste dos modelos de Midilli, seguido de Page e Dois Termos, pela correspondência entre os valores experimentais e estimados para as duas velocidades de ar estudadas, e isso confirma os parâmetros estimados apresentados na Tabela 3. Constata-se ainda que a umidade do produto decresce ao longo do tempo de processo e com temperatura do ar de secagem.

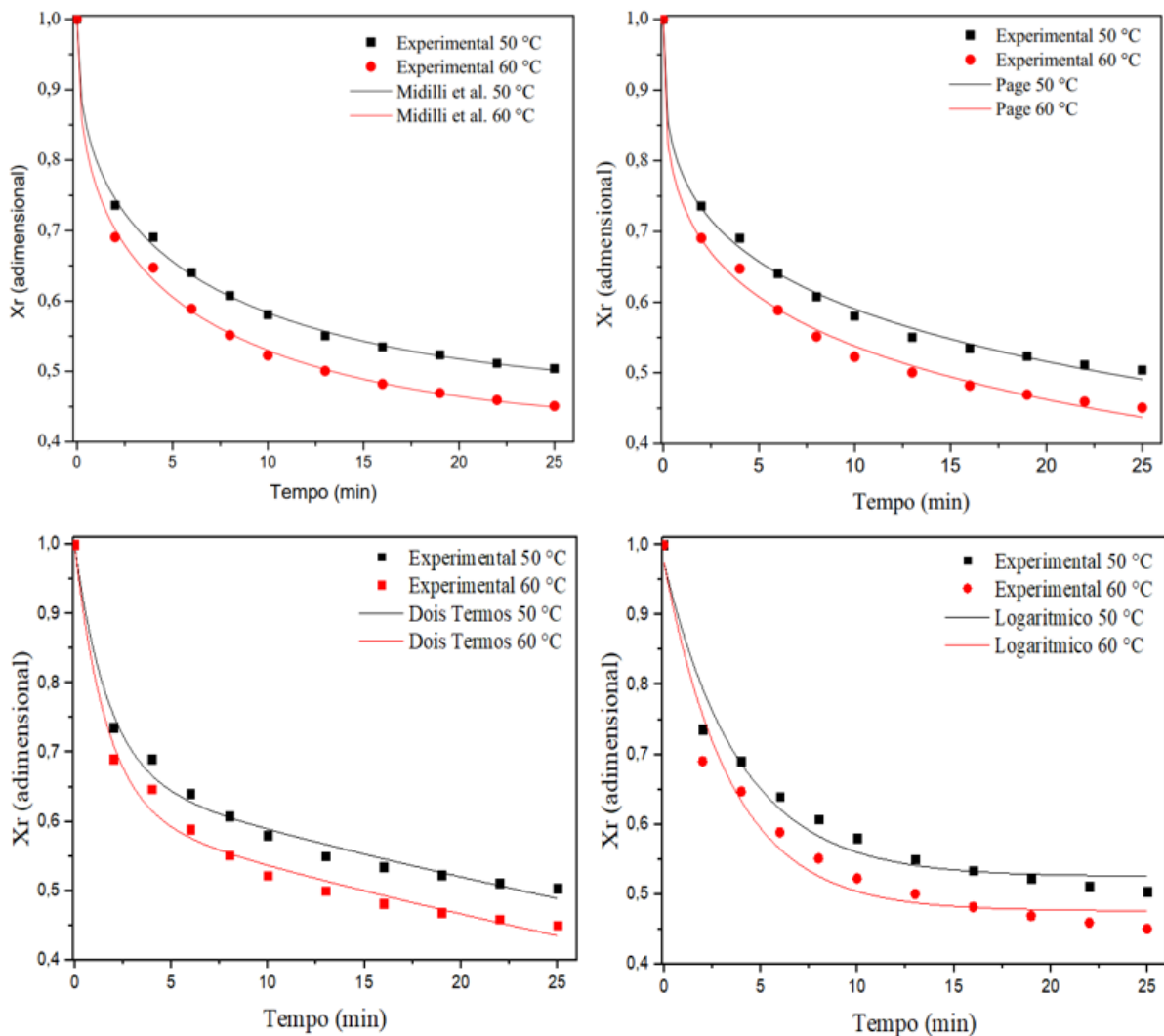


Figura 2 – Valores experimentais e estimados da razão de teor de água ( $X_r$ ) em função do tempo para a secagem dos grãos de arroz com casca para velocidade do ar de 3,73 m/s, de acordo os quatro modelos propostos.

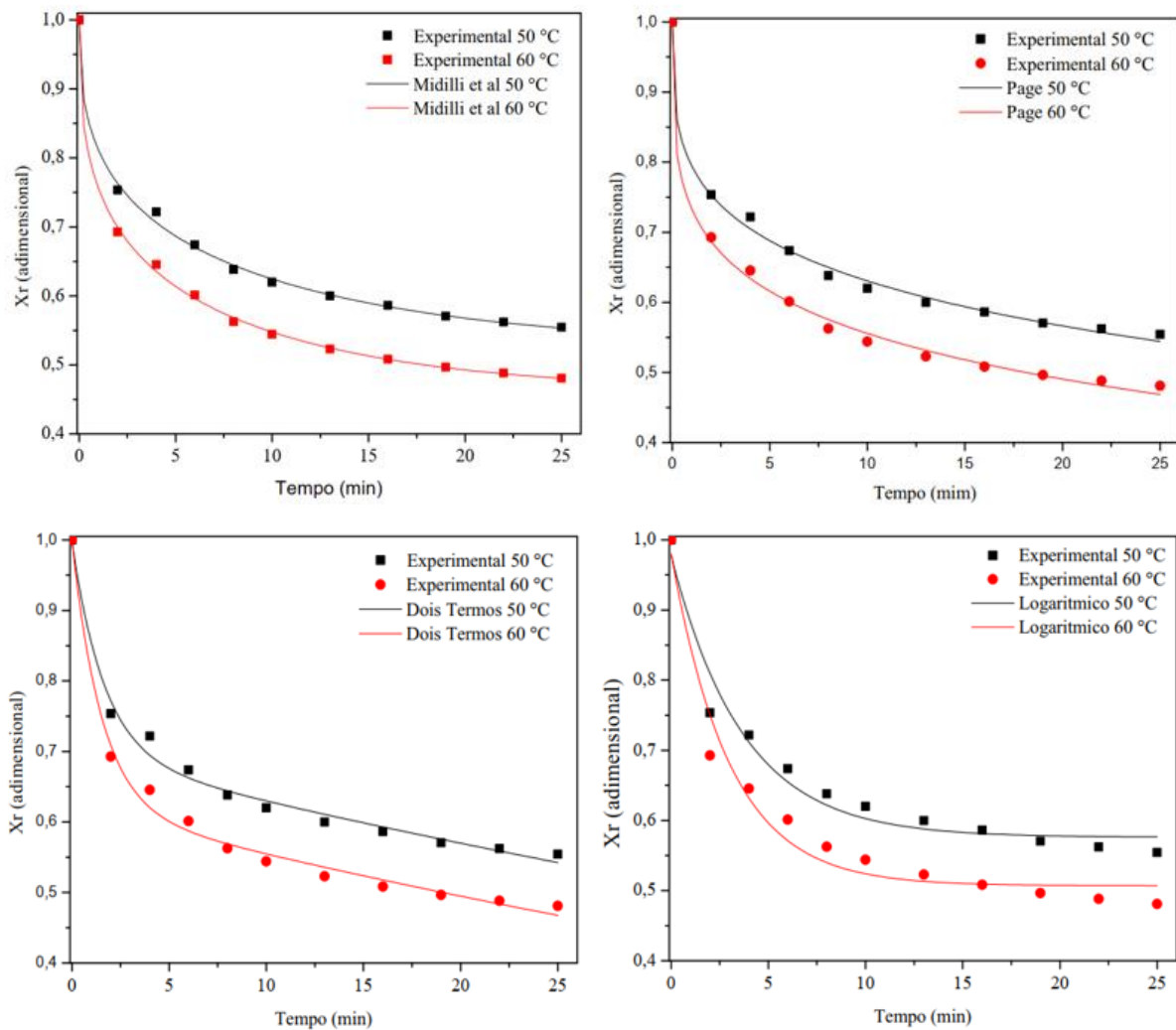


Figura 3 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água ( $X_r$ ) em função do tempo para a secagem dos grãos de arroz com casca para velocidade de 4,14 m/s, de acordo com os quatro modelos propostos.

#### 4. CONCLUSÕES

A temperatura do ar de secagem apresentou influência significativa na redução do teor de umidade do arroz com casca. Entre os quatro modelos testados, os de Midilli *et al.*, seguidos pelos de Page e Dois Termos, apresentaram uma boa reprodutibilidade para o perfil de secagem do arroz com casca conduzido no leito de jorro. Fato que pode ser confirmado pelos valores de  $R^2$  e DQM, que ficaram na faixa de 0,9981 - 0,9954 e de 0,00863 - 0,0185, respectivamente, para o  $R^2$  e DQM, assim como pela representação das curvas apresentadas. Como o ajuste dos modelos aplicados aos dados experimentais foi satisfatório, a utilização desses para simulação de condições de secagem será de fundamental importância para otimização do processo de secagem dos grãos de arroz com casca em trabalhos futuros.

#### Agradecimentos

A equipe agradece ao Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação do Norte de Minas Gerais – *Campus Montes Claros* pelo suporte ao trabalho realizado.



## REFERÊNCIAS

- BAGHERI, H. et. al. (2013), Mathematical modeling of thin layer solar drying of tomato slices. *CIGR Journal*, v. 15, n. 1 p. 146-153.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2009), *Regras para análise de sementes*. Brasília: Mapa/ACS.
- CELESTINO, S.M.C. (2010), *Princípios de Secagem de Alimentos*. Planaltina: Embrapa, 2010.
- DUARTE, C.R. (2006), Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e revestimento de partículas em leite de jorro. Tese de doutorado - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia.
- EMBRAPA. (2013), *Colheita, Secagem, Beneficiamento e Tratamento de Sementes de Arroz Irrigado*. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado.
- EMBRAPA. (2008), *Informações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Estado do Tocantins*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS- FAO. (2017), *Rice Market Monitor*. v 20, p.1-27. Disponível em :< <http://www.fao.org/economic/RMM> >. Acesso: maio de 2018.
- FOUST, A.S. (2011), *Princípios das Operações Unitárias*. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC.
- GEANKOPLIS, C. J. (1998), *Processos de transporte y operaciones unitarias*. México: Ceca.
- GONELLI, A.H.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. (2009), Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. Viçosa. *Revista Brasileira de Armazenamento*, p. 64-73, 2.
- KUCUK, H. A.; KILIC, A. DINCER, I. (2014), A review on thin-layer drying-crve equation. *Revista Drying Technology*, v.32, n.7, p. 757-773.
- LIMA, W.M.P.B. (2017), *Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: Modelagem e simulação*. 2017. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- MADAMBA, P.S.; ROBERT, H.D.; BUCKLE, K.A. (1996), The thin-layer dring characteristics of carlic slices. *Revista Journal of Food Engineering*, v 27, n 1, p. 75-97.
- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, K.A. (1974), *Spouted Beds*. New York: Academic Press.
- MEDEIROS, U.K.L. (2004), *Estudo da Secagem do Feijão Verde (Vigna unguiculata l. Walp)- Análise Experimental do Processo Combinado Leito Fixo/Leito de Jorro*. 2004. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SANTANA, E. B. (2011), *Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (Inum usitatissimum L.) em leito de jorro*. 2011. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém.
- SANTOS, D.C.; OLIVEIRA, E.N.A. (2013), Cinética de secagem de grãos de arroz-vermelho. *Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambiental*, v.11 p. 35-43.
- SILVA, L.M.M. (2014), Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. *Revista Brazilian Journal of Food Technology*, v.17, n.4 p. 310-318.

## MATHEMATICAL MODELLING OF ROUGH RICE DRYING CURVES IN A SPOUTED BED

**Abstract.** *Drying in spouted beds is a unit operation that has been gaining ground on scientific research for the drying of agricultural products. This operation aims to ensure the quality and stability of the product, since reducing the moisture content of the product reduces biological activity. Accordingly, this work aimed to study the drying of rough rice in a spouted bed dryer at the temperatures of 50 and 60 °C and drying air velocities of 3.73 and 4.14 m/s and to fit different mathematical models of drying to the experimental data in order to evaluate the predictive capacity of the models. The coefficient of determination ( $R^2$ ) and the root-mean-square deviation (RMSD) were used as evaluation criteria. The results showed that increases in drying air temperature resulted in greater reduction of moisture in the product. Among the models used, Midilli et al. followed by Page and Two-compartment presented good reproducibility for the drying process of rough rice with an initial moisture content of 22% on a wet basis, since they resulted in  $R^2$  values greater than 0.9859 and RMSD lower than 0.018.*

**Keywords:** *Drying models, moisture ratio, spouted bed.*