

**Cinética de secagem de café natural e descascado a baixa temperatura e umidade
relativa com emprego de uma bomba de calor**

**Drying kinetics of natural and parchment coffee at low temperature and relative
humidity using a heat pump**

**Cinética para secar café natural y pergamino a baja temperatura y humedad relativa
con el uso de una bomba de calor**

Recebido: 11/06/2020 | Revisado: 26/06/2020 | Aceito: 27/06/2020 | Publicado: 09/07/2020

Rodrigo Aparecido Jordan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-4461>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: rodrigojordan@ufgd.edu.br

Valdiney Cambuy Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-0330>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: vcambuy@yahoo.com

Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti-Mata

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-207X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: mcavalcantimata@gmail.com

Renata Henrique Hoscher

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5724-7173>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: renatahoscher@hotmail.com

Geraldo Acácio Mabasso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-8195>

Universidade Zambeze, Moçambique

E-mail: geral.do@hotmail.com

Anamari Viegas de Araujo Motomiya

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2170-8676>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: AnamariMotomiya@ufgd.edu.br

Fabrcio Correia de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-0667>

Universidade Tecnol3gica Federal do Paran3, Brasil

E-mail: fcoliveira@utfpr.edu.br

Elton Aparecido Siqueira Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3195-2317>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: eltonmartins@ufgd.edu.br

Rodrigo Couto Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4585-9305>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: rodrigocouto@ufgd.edu.br

Wellytton Darci Quequeto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0658-2692>

Instituto Federal de Ci4ncia, Educa3o e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: wellytton_quequeto@hotmail.com

Resumo

Objetivou-se com este trabalho avaliar a cin3tica de secagem dos gr3os de caf4 natural e descascado e ajustar modelos matem3ticos aos dados experimentais empregando um prot3tipo de bomba de calor. A metodologia cient3fica utilizada neste experimento foi uma pesquisa a n3vel de laborat3rio empregando o m3todo quantitativo. Os gr3os de caf4 foram submetidos a pr3-secagem em terreiro suspenso e quando atingiram os teores m3dios de 3gua inicial de 35,20 e 44,87% (base 3mida), para o caf4 natural e descascado, respectivamente, foram encaminhados para secagem no prot3tipo de sistema de secagem com bomba de calor. A secagem foi conduzida em camada fixa, utilizando 900 g de gr3os de caf4 natural e 700 g de caf4 descascado. Submeteu-se a secagem em quatro condi3es de temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa, em delineamento inteiramente casualizado, em tr3s repeti3es. A partir da determina3o da raz3o de umidade foram ajustados diferentes modelos matem3ticos para a descri3o da cin3tica de secagem dos gr3os de caf4. O tempo de secagem do caf4 natural e descascado utilizando o sistema de bomba de calor pode ser considerado baixo para todas as condi3es de secagem, dado as caracter3sticas morfol3gicas e do alto teor de 3gua inicial do produto. O modelo de Midilli descreveu satisfatoriamente a cin3tica de secagem do caf4 natural e descascado em baixa temperatura, utilizando o sistema de bomba de calor. A taxa

de secagem é maior para as maiores temperaturas apenas na fase inicial do processo.

Palavras-chave: Modelo matemático; *Coffea arabica* L.; Protótipo; Sistema automatizado.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the drying kinetics of natural and parchment coffee beans and to fit mathematical models to experimental data using a heat pump prototype. The scientific methodology used in this experiment was a research at the laboratory level using the quantitative method. The coffee beans were pre-dried on a suspended terrace and, when they reached the initial average moisture content of 35.20 and 44.87% (wet basis), for natural and parchment coffee, respectively, they were sent for drying in the prototype of a heat pump drying system. The drying was carried out in a fixed layer, with 900 g of natural coffee and 700 g of parchment coffee. Drying was carried out under four conditions of dry bulb temperature, dew point temperature and relative humidity, in a completely randomized design, in three replications. From the determination of the humidity ratio, different mathematical models were adjusted to describe the drying kinetics of coffee beans. The drying time of natural and parchment coffee using the heat pump system can be considered low for all drying conditions, given the morphological characteristics and the high initial moisture content of the product. The Midilli model satisfactorily described the drying kinetics of natural and parchment coffee at low temperature, using the heat pump system. The drying rate is higher for the highest temperatures only in the initial phase of the process.

Keywords: Mathematical model; *Coffea arabica* L.; Prototype; Automated system.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la cinética de secado de los granos de café natural y pergamino y ajustar los modelos matemáticos a los datos experimentales utilizando un prototipo de bomba de calor. La metodología científica utilizada en este experimento fue una investigación a nivel de laboratorio utilizando el método cuantitativo. Los granos de café se secaron previamente en una terraza suspendida y, cuando alcanzaron el contenido de agua promedio inicial de 35.20 y 44.87% (base húmeda), para café natural y pergamino, respectivamente, se enviaron para su secado. en el prototipo de un sistema de secado con bomba de calor. El secado se realizó en una capa fija, con 900 g de café natural y 700 g de café pergamino. El secado se realizó en cuatro condiciones de temperatura de bulbo seco, temperatura del punto de rocío y humedad relativa, en un diseño completamente al azar, en tres repeticiones. A partir de la determinación de la relación de humedad, se ajustaron diferentes

modelos matemáticos para describir la cinética de secado de los granos de café. El tiempo de secado del café natural y pergamino utilizando el sistema de bomba de calor puede considerarse bajo para todas las condiciones de secado, dadas las características morfológicas y el alto contenido inicial de agua del producto. El modelo Midilli describió satisfactoriamente la cinética de secado del café natural y pergamino a baja temperatura, utilizando el sistema de bomba de calor. La velocidad de secado es mayor para las temperaturas más altas solo en la fase inicial del proceso.

Palabras clave: Modelo matemático; *Coffea arabica* L.; Prototipo; Sistema automático.

1. Introdução

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com produção estimada, para a safra de 2020 de 62,02 milhões de sacas de 60 kg, em 1,85 milhões de hectares (Conab, 2020). O café é o segundo produto mais comercializado no mundo, ficando atrás apenas do petróleo. Entre as espécies, o café arábica (*Coffea arábica* L.) se destaca devido às suas propriedades sensoriais superiores (Kulapichitr et al., 2019).

Nas comercializações, o preço do café é determinado pela sua qualidade, o que justifica maiores investimentos em tecnologias que propiciem ao produto melhor aspecto físico e atributos sensoriais (Donovan et al., 2019).

Dentre as etapas de produção, as atividades pós-colheita são responsáveis por até 60% da qualidade da bebida de café, pois afetam diretamente os constituintes presentes nos grãos (Teshome et al., 2019). Sendo a secagem a etapa mais crítica desses processos para a preservação da qualidade (Olmos et al., 2017).

O emprego de temperaturas de secagem acima de 45 °C provoca danos térmicos as membranas celulares dos grãos, fazendo com que os componentes químicos entrem em contato com enzimas hidrolíticas e oxidativas, afetando as características de cor, sabor e aroma da bebida (Marques et al., 2008; Taveira et al., 2015; Alves et al., 2017; Borém et al., 2018).

Sistemas de secagem que possam operar com temperaturas relativamente baixas, representam uma solução para melhorar a qualidade de produtos sensíveis a temperatura, com a possibilidade de serem mais eficientes no que diz respeito ao consumo de energia, uma vez que utilizam o potencial de secagem do ar ambiente (Taşeri et al., 2018). Contudo, há uma dificuldade em obter baixas temperaturas de secagem em secadores convencionais, pois estes são baseados em aquecimento sensível do ar, estando associado com a umidade relativa. Isto

posto, para se obter baixa umidade relativa, tem-se que aumentar a temperatura, o que torna prejudicial para a qualidade do produto.

Diante disso, a inclusão da bomba de calor em um sistema de secagem proporciona baixos valores de umidade relativa sem a necessidade de elevação da temperatura e do fluxo de ar de secagem (Aktaş et al., 2014). Temperaturas mais baixas proporcionam menores danos térmicos e físicos, além de manter os princípios ativos e essências que podem ser volatilizados com a elevação da temperatura (Hossain et al., 2013).

Os sistemas que utilizam bombas de calor podem garantir a viabilidade do processo de secagem e a manutenção da qualidade do produto (Dong et al., 2017; Dong et al.; 2019), e têm sido relatadas como um processo energeticamente eficiente (Ziegler et al., 2013). Ademais, o sistema de bomba de calor é automatizado, controlando os parâmetros facilmente, sem a necessidade de cuidados extras (Liu et al., 2017).

A modelagem matemática e o conhecimento experimental dos produtos durante a remoção de água são aspectos importantes, pois essas informações são utilizadas para melhorar ou projetar novos sistemas de secagem, e até mesmo ter melhor controle sobre o processo (Park et al., 2014; Kilic, 2017; Siqueira et al., 2017; Doymaz, 2017; Phitakwinai et al., 2019).

No Brasil, o uso comercial de sistemas de secagem de bomba de calor que empregam baixa umidade relativa em baixas temperaturas, ainda é restrito, por falta de domínio de tecnologia. Alves et al. (2013) relataram dificuldades em encontrar na bibliografia científica, trabalhos com modelos que descrevessem a secagem do café a baixa temperatura e umidade relativa.

Assim, considerando a importância da secagem para a qualidade do café, e a carência de estudos de secagem com bomba de calor, objetivou-se com este trabalho avaliar a cinética de secagem dos grãos de café natural e descascado e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais empregando um protótipo de bomba de calor.

2. Metodologia

O trabalho de pesquisa laboratorial foi conduzido no Laboratório de Termodinâmica, Refrigeração e Energia (LTRE) da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD. O café utilizado (*Coffea arabica* L. cv. Catiguá), natural e descascado, foi proveniente da propriedade Vale das Palmeiras, produtora de café gourmet, localizada no município de Ribeirão Claro - PR.

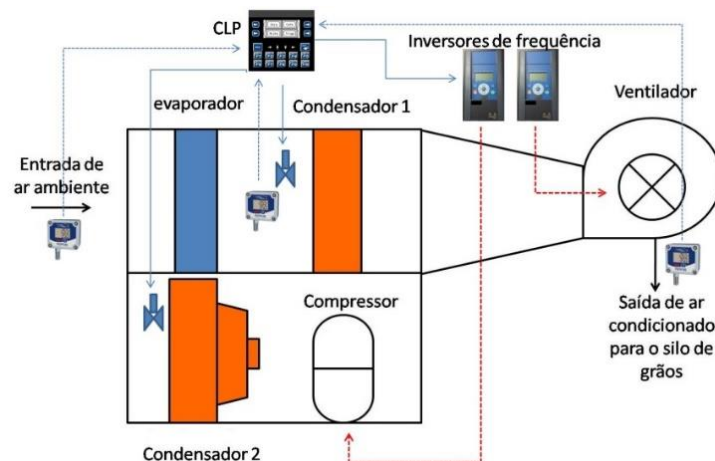
A metodologia científica utilizada neste experimento foi uma pesquisa a nível de

laboratório empregando o método quantitativo, ou seja, realiza-se a coleta de dados numéricos por meio do uso de medições de grandezas, assim, são gerados conjuntos de dados que são analisados por técnicas matemáticas como a análise estatística e equações aplicáveis para descrição do processo (Prodanov & Freitas, 2013; Pereira, et al., 2018).

Inicialmente, os cafés foram submetidos a pré-secagem em terreiro suspenso e quando se encontravam com os teores médios de água inicial de 35,20 e 44,87% b.u., para o café natural e descascado, respectivamente, foram encaminhados para secagem na UFGD. O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por 24 h em três repetições de aproximadamente 30 g (adaptado de Brasil, 2009).

Na Figura 1 está apresentado o protótipo de sistema de secagem com bomba de calor utilizado, chamado de Sistema Autônomo para Resfriamento e Controle Psicrométrico das Condições de Armazenagem de Grãos – SIARCONPAG, desenvolvido no LTRE, consiste de um módulo de controle higroscópico para grãos armazenados com capacidade de resfriamento de 1 TR (3.024 kcal h⁻¹). Esse equipamento foi projetado para levar o produto a condição de umidade de equilíbrio. O mesmo é capaz de resfriar, secar, aumentar e diminuir a quantidade de água no produto, dependendo dos valores programados de temperatura final e umidade de equilíbrio.

Figura 1 - Esquema de operação do SIARCONPAG.



Fonte: Própria (2020).

O SIARCONPAG opera com o evaporador e o condensador do sistema de refrigeração em série, no duto de condicionamento de ar. O sistema ainda conta com um condensador auxiliar (condensador 2) para controlar o aquecimento do ar, de acordo com as condições selecionadas, conforme apresentado na Figura 1. O direcionamento do fluxo de fluido

refrigerante entre cada condensador é feito por válvulas solenóides, agindo no controle de aquecimento do ar e diminuição da umidade relativa (UR).

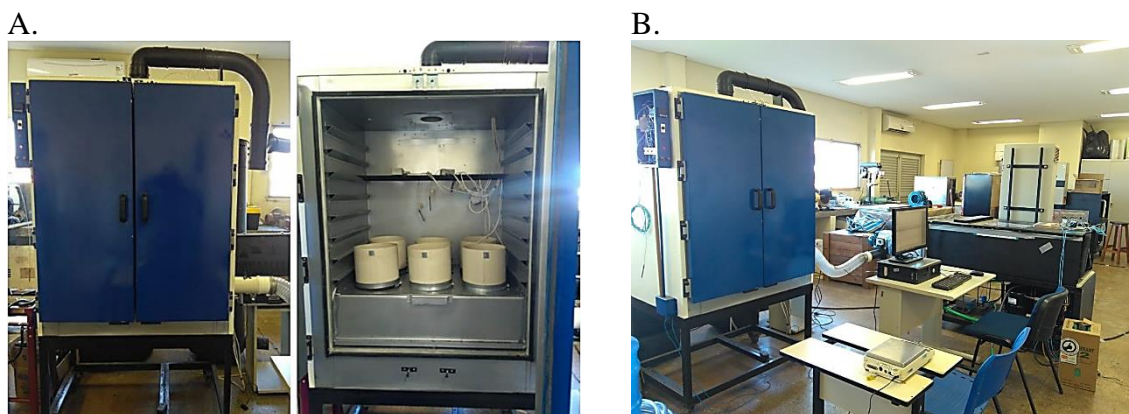
A operação do equipamento é supervisionada por um controlador lógico programável (CLP), onde estão inseridas as equações de umidade de equilíbrio. A operação começa com a seleção do produto, em seguida a temperatura e a umidade de equilíbrio desejada.

O CLP faz o ajuste automático das condições de operação, sendo, rotação do ventilador, rotação do compressor, abertura e fechamento das válvulas solenóides de controle de fluxo de fluido refrigerante pelos condensadores, em função das informações fornecidas por sensores de temperatura e UR instalados na entrada e saída do ar, para que as condições programadas sejam atendidas.

É possível também operar em um modo onde os dados programados são a umidade relativa e a temperatura de saída, sendo este o modo de operação utilizado para a realização do trabalho.

Na Figura 2 está apresentado a câmara de secagem juntamente com o protótipo SIARCONPAG utilizado no experimento.

Figura 2 – Câmara utilizada em conjunto com o SIARCONPAG (A) e Conjunto SIARCONPAG, câmara de secagem e sistema de aquisição de dados montados no LTRE (B).



Fonte: Própria (2020).

Para os testes de secagem, com pequenas quantidades de produto, o SIARCONPAG foi conectado a uma câmara isolada, conforme mostrado na Figura 2A, dotada de 6 saídas de ar, permitindo o uso de até 6 peneiras ao mesmo tempo. O conjunto foi conectado a um sistema de aquisição de dados conectado a um computador, para monitoração dos valores de UR e temperatura da câmara. Na Figura 2B é apresentado o conjunto câmara, equipamento de secagem e sistema de aquisição de dados.

As peneiras utilizadas possuíam diâmetro de 19 cm e altura de 18 cm. A secagem foi conduzida em camada fixa, utilizando 900 g de grãos de café natural e 700 g de café descascado. Submeteu-se a secagem em quatro condições de temperatura de bulbo seco (Tbs), temperatura de ponto de orvalho (Tpo) e umidade relativa (UR), conforme a Tabela 1, em delineamento inteiramente casualizado, em três repetições.

Tabela 1 - Valores médios das condições do ar de secagem.

Tratamento	Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)
15 °C	14,6	3,6	48,3
30 °C	30,2	4,3	19,9
35 °C	34,7	2,4	12,9
40 °C	39,6	3,3	10,3

Fonte: Própria (2020).

Iniciada a secagem, a massa das amostras foi pesada periodicamente, com auxílio de uma balança semi-analítica com resolução de 0,01 g. O teor de água durante a secagem foi determinado por diferença de massa, conhecendo-se o teor de água inicial, até que fosse atingido o teor de água final de pelo menos $11 \pm 1\%$ (b.u.).

Posteriormente foi determinado a razão de umidade do produto, para diferentes temperaturas do ar, pela Equação 1.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

em que:

RU = razão de umidade do produto, adimensional;

U_t = teor de água do produto em um determinado tempo, decimal (b.s.);

U_e = teor de água de equilíbrio do produto, decimal (b.s.); e

U_i = teor de água inicial do produto, decimal (b.s.).

O teor de água de equilíbrio em cada condição de secagem foi obtido por meio da equação de Harkins-Jura modificada.

$$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(UR)] \quad (2)$$

em que

T: temperatura do ar de secagem, °C;

UR: umidade relativa do ar de secagem (decimal);

a, b e c: coeficientes do modelo.

A partir da determinação da razão de umidade foram ajustados diferentes modelos matemáticos tradicionalmente utilizados em trabalhos científicos para a descrição da cinética de secagem de café, descritos na Tabela 2 (Resende et al., 2010; Alves et al., 2013; Siqueira et al., 2017).

Tabela 2 - Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas.

Descrição do modelo	Modelo
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$ (3)
Dois termos	$RU = a \exp(-K_0 t) + b \exp(-K_1 t)$ (4)
Exponencial de dois termos	$RU = a \exp(-K t) + (1-a)\exp(-k a t)$ (5)
Henderson e Pabis modificado	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-K_1 t)$ (6)
Logarítmica	$RU = a \exp(-kt) + b$ (7)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$ (8)
Newton	$RU = \exp(-k t)$ (9)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$ (10)

Fonte: Própria (2020).

em que:

t = tempo de secagem, h;

k, k_0 e k_1 = coeficientes dos modelos, h^{-1} ; e

a, b, c e n = coeficientes dos modelos, adimensionais.

A taxa de redução de água durante a secagem foi determinada segundo a equação:

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{MS (t_i - t_0)} \quad (11)$$

em que

TRA = taxa de redução de água, $kg \ kg^{-1} \ h^{-1}$;

Ma_0 = massa de água total anterior, kg;

Ma_i = massa de água total atual, kg;

MS = Massa seca, kg;

t_0 = tempo total de secagem anterior, h; e

t_i = tempo total de secagem atual, h.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados da secagem observados experimentalmente foi empregada a análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. O grau de ajuste do modelo foi avaliado pelas magnitudes do erro médio relativo (P, em porcentagem), do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal), e do coeficiente de determinação (R^2 , em decimal). Os valores do erro médio relativo indicam o desvio dos valores observados da curva estimada pelo modelo, considerando modelos satisfatoriamente ajustados, os que apresentarem valores de P abaixo de 10%. Quanto menor for o valor do desvio padrão da estimativa (SE), melhor é a eficácia de ajuste dos modelos aos dados observados experimentalmente. Além disso, para a seleção do modelo, foi utilizado como critério, o ajuste satisfatório em todas as temperaturas.

Os valores de P e SE para cada modelo foram calculados pelas Equações 12 e 13, respectivamente:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (12)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (13)$$

em que:

Y = valor observado experimentalmente;

\hat{Y} = valor estimado pelo modelo;

n = número de dados observados; e

GLR = graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

3. Resultados e Discussão

Para a descrição da cinética de secagem dos grãos de café natural e descascado, alguns modelos mostraram-se satisfatórios em atender aos critérios de seleção estabelecidos, porém em condições isoladas, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R²) e desvio padrão da estimativa (SE) dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem dos grãos de café natural e descascado para diferentes temperaturas.

Modelo	Natural			Descascado				
	P (%)	R ² (decimal)	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	SE (decimal)		
15 °C	3	20,2783	99,0531	0,0256	31,9986	99,7079	0,0229	
	4	28,2523	99,7038	0,0150	31,9963	99,7079	0,0264	
	5	25,9334	99,6376	0,0152	85,7143	75,5259	0,1872	
	6	2,8598	99,9634	0,0058	31,9973	99,7079	0,0457	
	7	31,5105	99,1824	0,0238	141,8191	90,1945	0,1324	
	8	6,5421	99,9265	0,0075	7,4460	99,9874	0,0055	
	9	20,2783	99,0531	0,0237	18,6734	98,5141	0,0421	
	10	31,4727	99,5418	0,0171	36,6487	99,5561	0,0252	
	30 °C	3	2,0884	99,9791	0,0045	9,3589	99,6290	0,0188
		4	2,1025	99,9792	0,0045	7,9761	99,7552	0,0156
5		13,7797	97,9799	0,0433	16,6725	99,0269	0,0298	
6		12,4328	99,1868	0,0291	15,9515	99,0801	0,0317	
7		7,2464	99,4977	0,0219	2,1953	99,9659	0,0057	
8		0,9445	99,9771	0,0047	2,3261	99,9589	0,0064	
9		13,7799	97,9799	0,0427	16,6705	99,0271	0,0292	
10		4,3832	99,9070	0,0093	10,4760	99,4979	0,0214	
35 °C	3	8,6353	99,6418	0,0167	6,1644	99,7838	0,0141	
	4	8,6365	99,6418	0,0171	5,0284	99,6940	0,0173	
	5	11,8309	96,6225	0,0502	6,5109	99,4470	0,0219	
	6	8,5075	99,3078	0,0250	2,1367	99,9444	0,0079	
	7	11,6980	98,7198	0,0316	3,6944	99,7318	0,0157	
	8	3,8732	99,8544	0,0109	2,6300	99,8560	0,0118	
	9	11,8314	96,6225	0,0491	5,7332	99,4265	0,0217	
	10	11,3790	99,3810	0,0215	6,8408	99,5560	0,0196	
40 °C	3	1,7578	99,9773	0,0042	4,1291	99,5452	0,0217	
	4	1,7643	99,9774	0,0043	9,0278	99,5402	0,0063	
	5	4,2692	99,6173	0,0169	15,4173	99,1006	0,0296	
	6	1,7643	99,9774	0,0044	6,7577	98,1653	0,0483	
	7	7,0562	99,2953	0,0234	2,7999	99,7749	0,0153	
	8	1,1867	99,9645	0,0054	5,0534	99,8155	0,0143	
	9	13,9416	97,0955	0,0458	15,4172	99,1006	0,0287	
	10	3,9763	99,9293	0,0090	12,8103	99,1613	0,0286	

Fonte: Própria (2020).

Nessas circunstâncias, os modelos apresentaram valores do erro médio relativo (P) menores que 10%, condição que indica melhor ajuste do modelo aos dados observados. Além do mais, resultaram em menores valores do desvio padrão da estimativa (SE) e elevados de R^2 .

Com base nos parâmetros estatísticos, o modelo de Midilli foi o que atendeu aos critérios de seleção em todas as condições propostas, mostrando-se satisfatório para descrever a cinética de secagem.

O modelo de Midilli foi recomendado por Isquierdo et al. (2013), ao secarem frutos de café em temperaturas do bulbo seco de 35, 40 e 45 °C, e pontos de orvalho de 2,6, 10,8 e 16,2 °C, utilizando um sistema de secagem semelhante ao usado neste trabalho.

No estudo de Alves et al. (2013), que consiste na secagem de frutos de café a temperaturas de 35, 40 e 45 °C, e ponto de orvalho de 2,6 °C, verificou-se que o modelo de Midilli atende aos critérios de seleção utilizado neste trabalho.

Em outras pesquisas com bomba de calor para secagem de outros produtos, também foi verificado que o modelo de Midilli obteve o melhor ajuste, a exemplo de Tunckal & Doymaz (2020) secando fatias de banana em temperatura entre 37 e 43 °C e Shi et al. (2013) secando tubérculos de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) em temperaturas na faixa de 5 a 45 °C.

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes do modelo de Midilli ajustados aos dados observados da cinética de secagem dos grãos de café natural e descascado em diferentes temperaturas de secagem.

Tabela 4 - Coeficientes ajustados do modelo de Midilli para secagem de grãos de café natural e descascado para diferentes temperaturas do ar de secagem.

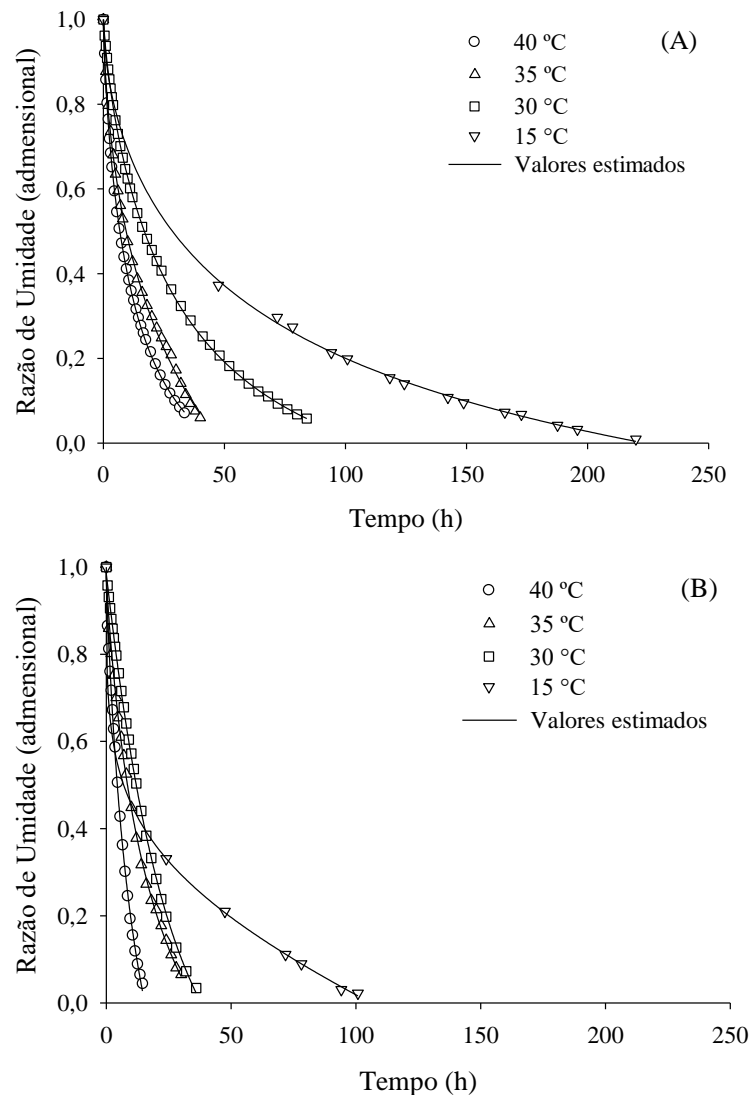
T (°C)	Natural				Descascado			
	a	k	n	b	a	k	n	b
15	1,0103	0,1729	0,7156	-0,0014	0,9788	0,1551	0,8865	-0,0109
30	1,0096	0,1561	0,6289	-0,0035	0,9857	0,1028	0,8437	-0,0033
35	1,0137	0,0867	0,7311	-0,0006	0,9832	0,0456	1,0300	-0,0038
40	0,9998	0,0923	0,5897	-0,0005	1,0000	0,3708	0,3003	-0,0021

Fonte: Autores.

Analisando a Tabela 4, as magnitudes dos coeficientes “a”, “k”, “n” e “b” para o modelo de Midilli, observa-se que não apresentaram uma tendência clara em função do aumento da temperatura de secagem.

Os parâmetros estatísticos empregados foram eficazes para selecionar o modelo, comprovado pela correspondência satisfatória entre os dados observados experimentalmente e os dados estimados pelo modelo de Midilli (Figura 3).

Figura 3 - Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Midilli com seus coeficientes descritos em função da temperatura do ar de secagem para os grãos de café natural (A) e descascado (B).

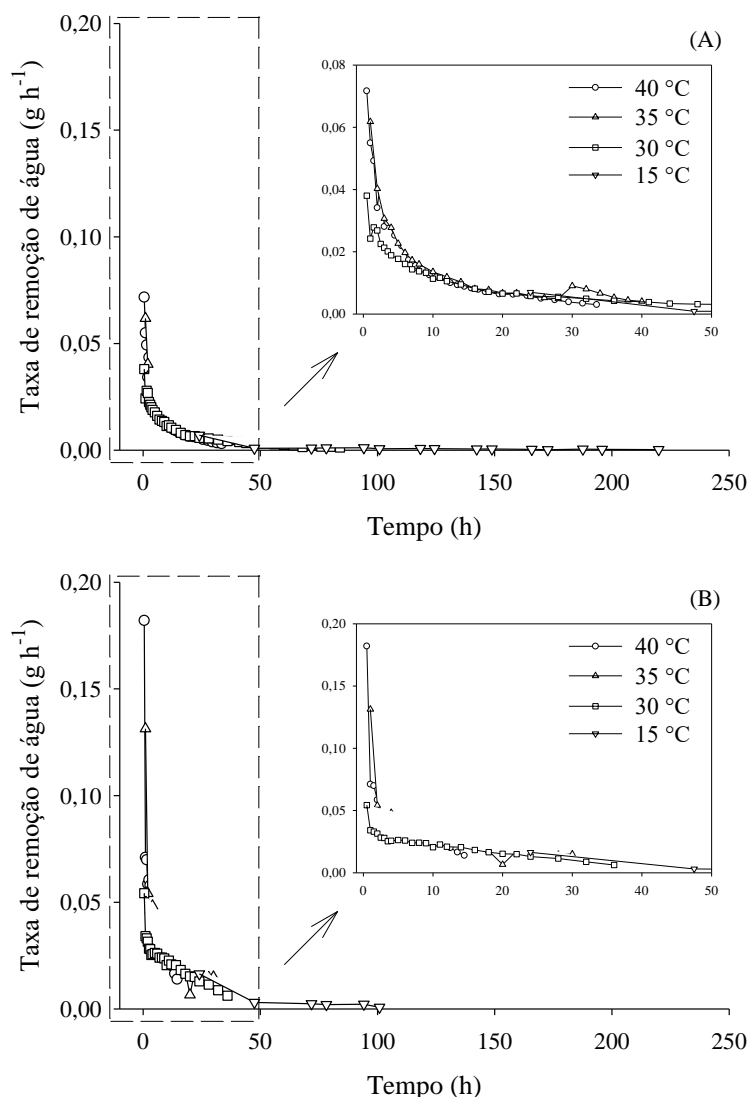


Fonte: Própria (2020).

Observa-se que ao elevar a temperatura, reduz-se o tempo de secagem, assim como, para uma mesma temperatura, o tempo de secagem foi menor para os grãos de café descascado. Isso se deve as diferenças morfológicas entre o café descascado e o natural (Siqueira et al., 2017). Quanto menor o número de barreiras físicas, maior será a difusão de líquidos (Alves et al., 2013).

Na Figura 4 está apresentado a taxa de remoção de água dos grãos de café durante a secagem. Em todas as temperaturas, o início do processo de secagem dos grãos de café é caracterizado pela maior remoção de água, em comparação ao final, pois neste momento, há um alto teor de água na superfície do produto, fazendo com que a água seja evaporada com mais facilidade. Posteriormente, a água presente no interior se desloca gradativamente para as camadas mais externas do produto, passando a vigorar o processo de difusão líquida, no qual é influenciado pela temperatura do ar de secagem (Babalís et al., 2006).

Figura 4 - Taxa de remoção de água dos grãos de café natural (A) e descascado (B) durante a secagem.



Fonte: Própria (2020).

A taxa de remoção de água (TRA) foi maior para a temperatura de 40 °C. De acordo com Botelho et al. (2018), o incremento da temperatura promove aumento do potencial do ar

de secagem e da transferência de calor para o produto, desta forma, a velocidade de formação e migração do vapor d'água do interior para a superfície e ambiente é maior. Constata-se que a TRA reduz continuamente com o tempo, conforme o teor de água do produto se aproxima ao seu teor de água de equilíbrio.

No início da secagem a taxa de redução de água do café descascado é maior em comparação ao café natural. Este comportamento está relacionado ao maior teor de água inicial do produto e com suas características morfológicas. A produção do café descascado envolve a remoção do exocarpo e parte do mesocarpo. Assim, reduz-se a as barreiras físicas para passagem de água, bem como, a distância a ser percorrida pela água na forma de vapor durante o processo de secagem. Com o decorrer do processo e redução do teor de água, a água fica mais fortemente ligada à matéria seca do produto, assim, observa-se baixos valores de taxa de redução de água em ambos os cafés.

4. Considerações Finais

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, conclui-se que:

O tempo de secagem do café natural e descascado utilizando o sistema de bomba de calor pode ser considerado baixo para todas as condições de secagem, dado as características morfológicas e do alto teor de água inicial do produto.

O modelo de Midilli descreveu satisfatoriamente a cinética de secagem do café natural e descascado em baixa temperatura, utilizando o sistema de bomba de calor.

A taxa de secagem é maior para as maiores temperaturas apenas na fase inicial do processo.

Para trabalhos futuros envolvendo o uso de bombas de calor para secagem, recomenda-se como sugestão, a determinação do coeficiente de difusão para cada condição de secagem, de forma a caracterizar a velocidade de saída da água.

Agradecimentos

A Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelo apoio financeiro a pesquisa que originou o trabalho.

A empresa Procer pelo apoio financeiro ao trabalho.

A Vale das Palmeiras cafés especiais pela sessão das amostras de café para os testes.

Referências

- Aktaş, M., Ceylan, İ., & Gürel, A. E. (2014). Testing of a condensation-type heat pump system for low-temperature drying applications. *International Journal of Food Engineering*, 10(3), 521-531. doi: 10.1515/ijfe-2014-0124
- Alves, G. E., Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Siqueira, V. C., Cirillo, M. Â., & Pinto, A. C. F. (2017). Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39(2), 225-233. doi: 10.4025/actasciagron.v39i2.31065
- Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Borém, F. M., Siqueira, V. C., Oliveira, P. D., & Andrade, E. T. (2013). Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, 8(2), 238-247.
- Babalís, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 205-214. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.008
- Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. D. S. (2018). Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates. *Coffee Science*, 13(2), 159-167. doi: 10.25186/cs.v13i2.1410
- Botelho, F. M.; Hoscher, R. H.; Hauth, M. R.; Botelho, S. C. C (2018). Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. *Revista engenharia na agricultura*, 26(1), 13–25. doi:10.13083/reveng.v26i1.807. doi: 10.13083/reveng.v26i1.807
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. (2009). *Regras para análise de sementes*.
- Companhia Nacional de Abastecimento – Conab. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 6 - Safra 2020, n. 1 - Primeiro levantamento, Brasília, p. 1-62, janeiro 2020.

Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, 234(1), 121–130. doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.156

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, 272(1), 723–731. doi:10.1016/j.foodchem.2018.08.068

Donovan, N. K., Foster, K. A., & Parra Salinas, C. A. (2019). Analysis of green coffee quality using hermetic bag storage. *Journal of Stored Products Research*, 80(1), 1–9. doi:10.1016/j.jspr.2018.11.003

Doymaz, İ. (2017). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer*, 53(1), 25–35. doi:10.1007/s00231-016-1791-8

Hossain, M. A., Gottschalk, K., & Hassan, M. S. (2013). Mathematical Model for a Heat Pump Dryer for Aromatic Plant. *Procedia Engineering*, 56(1), 510–520. doi:10.1016/j.proeng.2013.03.154

Isquierdo, E. P.; Borém, F. M.; Andrade, E.T.; Corrêa, J. L. G.; Oliveira, P. D.; Alves, G. E. (2013). Drying kinetics and quality of natural coffee. *Transactions of the ASABE*, 56(3), 995–1001. doi:10.13031/trans.56.9794

Kilic, A. (2017). Mathematical modeling of low temperature high velocity (LTHV) drying in foods. *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), e12378. doi:10.1111/jfpe.12378

Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chemistry*, 291(1), 49–58. doi:10.1016/j.foodchem.2019.03.152

Liu, Y., Zhao, K., Jiu, M., & Zhang, Y. (2017). Design and drying technology research of heat pump lentinula edodes drying room. *Procedia Engineering*, 205(1), 983–988. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.154

Marques, E. R., Borém, F. M., Pereira, R. G. F. A., & Biaggioni, M. A. M. (2008). Eficácia do teste de acidez graxa na avaliação da qualidade do café Arábica (*Coffea arabica* L.) submetido a diferentes períodos e temperaturas de secagem. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(5), 1557–1562. doi:10.1590/s1413-70542008000500030

Olmos, L. C., Duque, E. A., & Rodriguez, E. (2017). State of the art of coffee drying technologies in Colombia and their global development. *Revista Espacios*, 38(29), 27-36.

Park, K. J. B., Park, K. J., Alonso, L. F. T., Cornejo, F. E. P., & Fabbro, I. M. (2014). Secagem: fundamentos e equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 16(1), 93–127. doi:10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica. [e-book]*. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1. Acesso em: 01 junho 2020.

Phitakwinai, S., Thepa, S., & Nilnont, W. (2019). Thin-layer drying of parchment *arabica* coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science & Nutrition*, 7(9), 2921–2931. doi:10.1002/Fsn3.1144

Prodanov, C. C.; Freitas, E. C. de. (2013). *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*, 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale. Disponível em: <http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 02 junho 2020.

Resende, O., Rodrigues, S., Siqueira, V. C., & Arcanjo, R. V. (2010). Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. *Acta Amazonica*, 40(2), 247–255. doi:10.1590/s0044-59672010000200002

Shi, Q., Zheng, Y., & Zhao, Y. (2013). Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management*, 71(1), 208–216. doi:10.1016/j.enconman.2013.03.032

Siqueira, V. C., Borém, F. M., Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Pinto, A. C. F., Ribeiro, D. E., & Ribeiro, F. C. (2017). Drying kinetics of processed natural coffee with high moisture content. *Coffee Science*, 12(3), 400-409. doi:10.25186/CS.V12I3.1320

Taşeri, L., Aktaş, M., Şevik, S., Gülcü, M., Uysal Seçkin, G., & Aktekeli, B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food Chemistry*, 260(15), 152–159. doi:10.1016/j.foodchem.2018.03.122

Taveira, J. H. D. S., Sttela, D. V. F. D. R., Pedro, D. O., Gerson, S. G., & Eder, P. I. (2015). Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. *African Journal of Agricultural Research*, 10(12), 1457–1466. doi:10.5897/ajar2014.9263

Teshome, K., Girma, Z., & Eshetu, B. (2019). Assessment of pre and post-harvest management practices on coffee (*Coffea arabica* L.) quality determining factors in Gedeo zone, Southern Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 14(28), 1216-1228. doi: 10.5897/ajar2019.14116

Tunckal, C., & Doymaz, İ. (2020). Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. *Renewable Energy*, 150(1), 918–923. doi:10.1016/j.renene.2020.01.040

Ziegler, T., Jubaer, H., & Mellmann, J. (2013). Simulation of a heat pump dryer for medicinal plants. *Chemie Ingenieur Technik*, 85(3), 353–363. doi:10.1002/cite.201200123

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rodrigo Aparecido Jordan – 15%

Valdiney Cambuy Siqueira – 15%

Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti-Mata – 9%

Renata Henrique Hoscher – 9%

Geraldo Acácio Mabasso – 9%

Anamari Viegas de Araujo Motomiya – 9%

Fabício Correia de Oliveira – 9%

Elton Aparecido Siqueira Martins – 9%

Rodrigo Couto Santos – 7%

Wellytton Darci Quequeto – 9%