

## MODELAGEM MATEMÁTICA DA UMIDADE RELATIVA DO AR EM CONTATO COM OS GRÃOS DE CAFÉ RECÉM TORRADOS

GUILLERMO A. VARGAS-ELÍAS<sup>1</sup>, AMANDA PÉREZ-FERNÁNDEZ<sup>2</sup>, DAVID  
VARGAS-GÓMEZ<sup>3</sup>, BRYAN BADILLA-MENA<sup>4</sup>, FABIÁN JIMÉNEZ-REY<sup>5</sup>

<sup>1</sup> D. Sc., Eng. Agrícola. Professor - Universidad de Costa Rica (U.C.R.), [guillermo.vargaselias@ucr.ac.cr](mailto:guillermo.vargaselias@ucr.ac.cr), San José-CR.

<sup>2</sup> Estudante de Engenharia Agrícola e Biosistemas. U.C.R., San José-CR.

<sup>3</sup> Estudante de Direção de Empresas. U.C.R., San José-CR.

<sup>4</sup> Bach. Estudante de Agronomia. U.C.R., San José-CR.

<sup>5</sup> M. Sc., Eng. Agrícola. Professor. Depto. Eng. Biosistemas. U.C.R., San José-CR.

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** Segundo a regulamentação brasileira, o teor de água nos grãos de café torrados deve ser inferior a 5% b.u., que quando colocados no interior do recipiente geram uma condição seca no ar. O objetivo do estudo foi determinar a cinética da umidade relativa do ar em contato com os grãos de café recém-torrados pelo método de equilíbrio semi-estático. Os grãos de café arábica geisha com teor de umidade de 10,12% b.u. foram torrados numa temperatura inicial de 280 °C, obtendo-se 6 níveis de torrefação em relação a 215, 220, 225, 230, 235 e 240 °C. Após a torrefação, os grãos foram ingressados no interior de um recipiente com um sensor tipo *datalogger* por 24 horas onde foi registrada a umidade relativa. Os dados foram ajustados adequadamente com a equação de Page, e para a razão da umidade relativa do ar se obteve um coeficiente de determinação maior que 0,989 para cada nível de torra e, além disso, determinou-se que o ar atingiu o equilíbrio em 8 h. A umidade relativa de equilíbrio entre o ar e os grãos de café recém-torrados foi registrada na faixa entre 16 e 32%.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Coffea arabica*, equilíbrio higroscópico, modelagem matemática.

### “MATHEMATICAL MODELING OF THE RELATIVE AIR HUMIDITY IN CONTACT WITH FRESHLY ROASTED COFFEE BEANS”

**ABSTRACT:** According to Brazilian regulations, the water content in roasted coffee beans should be less than 5% wb, creating a dry condition in the air when placed inside a container. The objective of this study was to determine the kinetics of the relative humidity of air in contact with freshly roasted coffee beans based in the equilibrium semi-static method. Arabica geisha coffee beans with a moisture content of 10.12% wb were roasted at an initial temperature of 280 °C, obtaining 6 levels of roast at 215, 220, 225, 230, 235, and 240 °C. After roasting, the beans were placed inside a container with a data logger sensor for 24 hours, during which relative humidity was recorded. The data were properly adjusted with the Page equation, and for the relative air humidity ratio, a determination coefficient greater than 0.989 was obtained for each roast level, determining that the air reached equilibrium in 8 hours. The equilibrium relative humidity for freshly roasted coffee was recorded between 16 and 32%.

**KEYWORDS:** *Coffea arabica*, hygroscopic equilibrium, mathematical modeling.

**INTRODUÇÃO:** Os grãos de café torrados devem ser comercializados com um teor de água menor que 5% b.u. segundo a normativa brasileira (MAPA, 2020). Nas pesquisas foi determinado uma faixa do teor de água entre 1 e 3,5% em base úmida (b.u.) quando os grãos foram resfriados com ar à temperatura ambiente imediatamente após da torra com a aplicação do ar em fluxo transversal (BARRANTES, 2022; ABARCA, 2017). O café torrado na moagem grossa (1,19 mm) com umidade 3% b.s. foi associado com uma atividade de água de 0,35 no armazenamento a 25 °C, também o equilíbrio higroscópico da amostra pode ser atingido pelo método estático usando uma dissolução de sais ou pelo método dinâmico usando uma unidade de acondicionamento do ar (BAPTESTINI, 2011), mas no método semi-estático é preciso do tempo necessário para atingir o equilíbrio do ar em contato com os grãos, aliás foi observado que para atingir o equilíbrio em amostras de café com e sem pergaminho foram necessárias 48 h para fazer a análise de teor de água nos grãos (JIMÉNEZ; VALVERDE, 1999). No sistema em equilíbrio termodinâmico a atividade de água é igual à umidade relativa de equilíbrio (JIAN; JAYAS, 2022). Os grãos são materiais higroscópicos que interagem com a umidade do ambiente, geralmente o intercâmbio da umidade acontece mediante o mecanismo de difusão líquida e gasosa (JOARDDER et al., 2021). O ar sempre estará em contato com a superfície dos grãos, e quando se acha entre os grãos, é conhecido como ar intergranular de 45% do volume aparente dos grãos torrados (VARGAS-ELÍAS, 2011). O objetivo deste trabalho foi determinar a cinética da umidade relativa do ar em contato com os grãos de café recém torrados pelo método equilíbrio semi-estático.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O trabalho foi realizado no Laboratório do Processamento Agrícola do Centro de Pesquisa em Grãos e Sementes da Faculdade de Ciências Agroalimentarias da Universidade de Costa Rica. Os grãos de café arábica da variedade geisha, com teor de umidade de 10,12% b.u. foram torrados a 280 °C no torrador a gás com cilindro horizontal. Foram obtidos 6 níveis de torrefação em amostras de 600 g submetidas às temperaturas do torrador de 215, 220, 225, 230, 235 e 240 °C, como se observa na Figura 1.

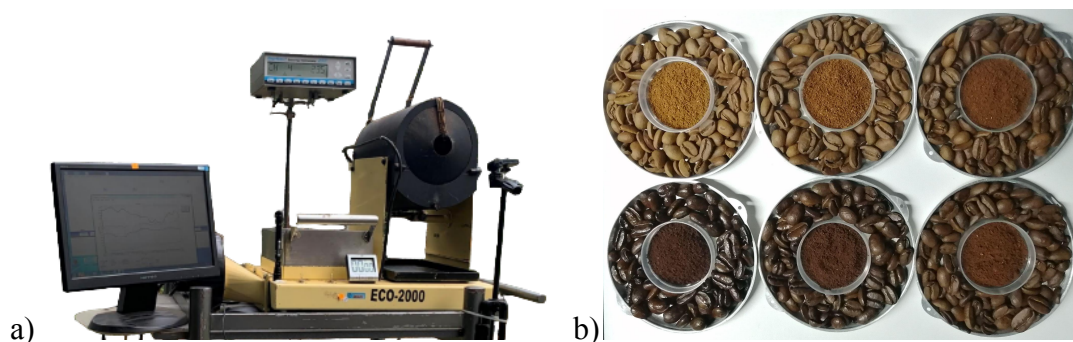


FIGURA 1. Torrador de cilindro horizontal (a) e nível de torra dos grãos em função da temperatura final do torrador desde 215 até 240 °C (b).

Foram utilizados 500 g de grãos de café torrados em recipiente de 2 L herméticos numa câmara a 25 °C. A umidade relativa foi medida por 24 h, após a torrefação dos grãos de café pelo sensor marca HOB0 modelo H08. Foi usado um programa Boxcar Pro 4.0 para configurar o medidor com leituras a cada 5 min. A variação estabelecida no manual do medidor para a leitura da umidade relativa foi no modelo quadrado  $\pm 5\%$  e no modelo redondo foi  $\pm 3,5\%$  (HOB0, 2016). Os grãos torrados e secos diminuíram a umidade do ar até atingir o equilíbrio. A umidade relativa do equilíbrio foi o mínimo valor ( $U_e$ ), os dados

foram ajustados à equação 1, visto que na secagem de produtos agrícolas o modelo de Page é muito utilizado (KUCUK; MIDILLI, 2014).

$$U = U_e + (U_i - U_e)e^{-k(t^n)} \quad (1)$$

Onde:

$U$  : umidade relativa durante o processo [%],

$U_e$  : umidade relativa do equilíbrio [%]

$U_i$  : umidade relativa no início [%]

A razão da umidade relativa (RU) foi definida para comparar os níveis de torra na equação 2:

$$RU = \frac{(U - U_e)}{(U_i - U_e)} \quad (2)$$

Os coeficientes  $k$  e  $n$  do modelo matemático foram determinados pelo ajuste na regressão não linear no programa Sigmaplot 15.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Observou-se a diminuição da umidade relativa com tendência exponencial decrescente até se estabilizar em 8 h nos diferentes níveis de torra dos grãos, conforme o aumento da temperatura de extração dos grãos se observa na Figura 2a.

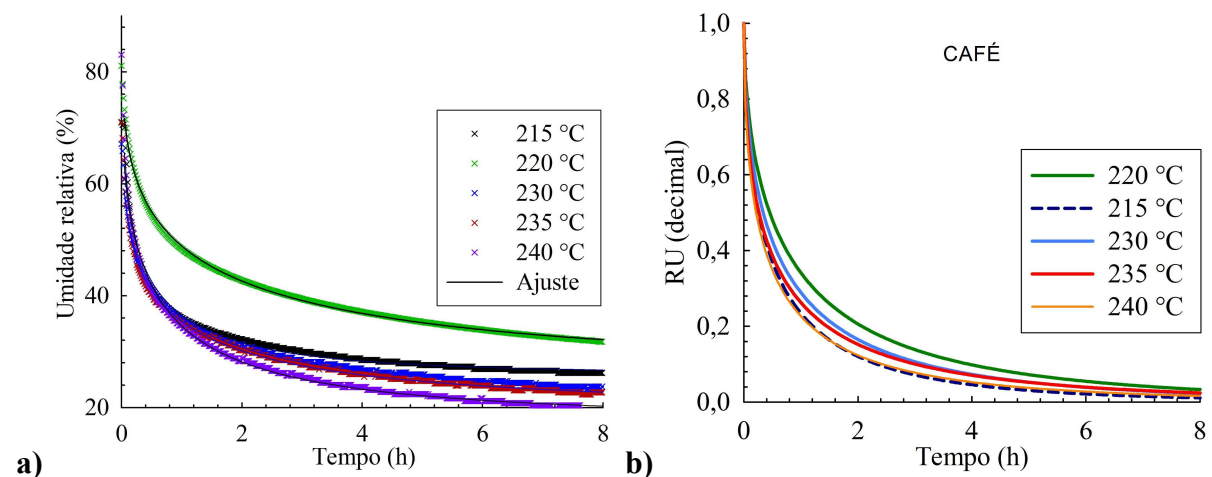


FIGURA 2. Cinética da umidade relativa do ar (a) e a razão de umidade relativa (b) em contato com os grãos torrados de café armazenados a 25 °C.

A análise da razão da umidade relativa (Fig. 2b) facilitou a comparação entre todas as cinéticas. A razão da umidade relativa do ar foi ajustada adequadamente com coeficiente de determinação maior que 0,989 para cada nível de torra dos grãos de café.

Na Tabela 1 observa-se os valores dos coeficientes do nível de torra dos grãos para a razão da umidade relativa do ar em contato com o café.

TABELA 1. Constantes do modelo de Page determinadas para cada nível de torra.

$k^*$ ( $h^{-1}$ )	$HRi^*$ ( $h^{-1}$ )	$HRe^*$ ( $h^{-1}$ )	$R^{2*}$ (dec.)	T (°C)	k ( $h^{-1}$ )	n (adi.)	$R^2$ (dec.)	SEE (%)
2,1233	71,04	28,49	0,8983	215	1,4502	0,5457	0,9750	0,0238
1,2423	81,06	35,40	0,8739	220	1,0753	0,5551	0,9904	0,0163
1,6048	67,09	26,17	0,8857	230	1,2411	0,5376	0,9924	0,0136
1,9009	70,91	25,61	0,8326	235	1,3372	0,4933	0,9898	0,0146
2,2120	83,04	23,42	0,8406	240	1,4844	0,4944	0,9930	0,0115

Entre os níveis de torra, o valor do expoente ( $n$ ) pode ser constante, enquanto o coeficiente cinético ( $k$ ) foi relacionado à rapidez do processo para atingir o equilíbrio higroscópico entre o ar e os grãos. A faixa da umidade relativa do equilíbrio foi desde 16 até 32%, que inclui o nível de torra médio dos grãos, semelhante aos valores obtidos por Baptestini (2011) pelo equilíbrio estático.

**CONCLUSÃO:** A cinética da umidade relativa do ar foi exponencialmente decrescente até atingir o equilíbrio com os grãos de café recém-torrados, para isso foram necessárias 8 horas e o processo foi ajustado adequadamente pelo modelo de Page.

## REFERÊNCIAS:

- ABARCA, R. **Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional**. Trabalho de graduação em Engenharia Agrícola, Universidad de Costa Rica. 2017 Disponível em: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352>.
- BAPTESTINI, F.M. **Efeito da granulometria e da embalagem na sorção de água pelo café torrado e moído**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, M.G., Brasil. 2011. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3601>.
- BARRANTES M., S. **Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (*Coffea arabica*)**. Trabalho de graduação em Engenharia Agrícola, Universidad de Costa. 2022. Disponível em: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86824>.
- HOBO. (2016). **HOBO H8 Family Data Loggers (H08-00x-02) User's Manual** | Onset's HOBO and InTemp Data Loggers. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/resources/documentation/2016-man-ho8>.
- JIAN, F.; JAYAS, D. S. **Grains: Engineering Fundamentals of Drying and Storage**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003186199>.
- JIMÉNEZ, R.; VALVERDE, R. Relaciones de humedad de equilibrio para café (*Coffea arabica*) de primera calidad en Costa Rica. **Revista Tecnología En Marcha**, v. 13, n. 2, p. 61–69, 1999. disponível em: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/4144](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4144).
- JOARDDER, M. U. H.; AKRAM, W.; KARIM, A. The Physics in Drying. In: **Heat and Mass Transfer Modelling During Drying**. CRC Press. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429461040-2>.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Regulamento Técnico do Café Torrado**. Decreto nº 10.253, 2020.
- KUCUK, H., A; MIDILLI, A; KILIC; DINCER. A review on thin-layer drying-curve equations. **Drying Technology**, v. 32, p. 753–773, 2014.
- VARGAS-ELÍAS, G.A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 2011. 114 p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.