

**AJUSTE MATEMÁTICO DEL PERFIL DE TUESTE PARA EL CAFÉ NATURAL
ANÁLISE MATEMÁTICO DO PERFIL DE TORRA DO CAFÉ NATURAL EM
TORRADOR CONVENCIONAL**

BARRANTES S.¹, VARGAS-ELÍAS G.², ROJAS B. S.³, CASTRO I.⁴, CASTILLO J.⁵

1 Bach., Ing. Agrícola y de Biosistemas. U.C.R., sergioi.barrantes@gmail.com, sergio.barrantes@ucr.ac.cr

2 D. Sc., Ing. Agrícola. CIGRAS - Universidad de Costa Rica, (506) 2511 8820, guillermo.vargaselias@ucr.ac.cr

3 Estudiante de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas. Universidad de Costa Rica, sebastian.rojasbarrantes@ucr.ac.cr

4 Bach., Ing. Agrónoma. Universidad de Costa Rica, ivccastro5@gmail.com, ivcc@ucr.ac.cr

5 Bach., Ing. Agrónomo. Universidad de Costa Rica, joca122793@gmail.com, jorge.castillovives@ucr.ac.cr

Apresentado no
XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020
23 a 25 de novembro de 2020, Brasil

RESUMEN: La torrefacción del café natural debe estudiarse para mantener las características de aroma y sabor durante el tueste, aunque en Costa Rica tiene un mercado reducido, su consumo está creciendo más entre los cafés especiales. El objetivo del trabajo fue ajustar un modelo matemático para representar el perfil de tueste en los granos de café natural. Se utilizó un tostador rotativo perforado con quemadores de gas directo de construcción nacional, se utilizó un sistema de adquisición de datos de temperatura en sensor termopar. Se utilizaron granos de café de la variedad catuaí rojo en tres diferentes niveles de tueste desde *claro* hasta *medio*. Se analizaron dos ecuaciones desarrolladas para en el tostador convencional. Se identificaron dos secciones del perfil de tueste y se ajustó adecuadamente un modelo exponencial-lineal para representar el perfil de tueste del café. La sección lineal permite predecir la temperatura y el tiempo de tueste con una tasa constante de aproximadamente 7 °C/min.

PALABRAS CLAVE: Tostador convencional, *coffea arabica*, variedad catuaí rojo, secado solar, beneficiado seco.

**MATHEMATICAL ADJUSTMENT FOR ROASTING PROFILE IN DRUM
ROASTER WITH NATURAL COFFEE BEANS**

ABSTRACT: The roasting of natural process coffee must be studied to maintain the aroma and flavor characteristics during the roasting process, although in Costa Rica this type of coffee has a small market, the consumption is growing among specialty coffees. The objective of the work was to fit a mathematical model that represents the roasting profile of natural process coffee beans. A perforated rotary roaster with direct gas burners was used for the roasting, red Catuaí coffee beans were roasted at three different levels from light to medium. Two equations developed for the conventional roaster were analyzed. Identifying two sections on the roasting profile and an exponential-linear model was appropriately adjusted to represent the coffee roasting process. The linear section allows us to predict the temperature and the roasting time with a constant rate of approximately 7° C/min.

KEYWORDS: Drum roaster, *Coffea arabica*, Red Catuaí variety, solar drying, dry processing.

INTRODUCCIÓN: El café natural se obtiene mediante el beneficiado seco y consiste en secar la fruta del café inmediatamente después de la cosecha y exponerla directamente al sol, en Costa Rica no es común pero hay pequeños lotes de calidad especial, una muestra de café natural debería tener un rendimiento del 50%, extrayendo el material residual (SUALEH; MEKONNEN, 2015). En otros países, generalmente se utilizan en grandes extensiones de terreno, usualmente con suelo de concreto y utilizando la radiación solar como fuente de calor para el secado (CLARKE; MACRAE, 1987)

El tamaño del grano es uno de los factores que pueden influir en la calidad del café (DERIBE, 2019). A pesar de que no existe un estándar general de clasificación de calidad por tamaño ya que cada país exportador cuenta con estándares propios (ICO, 2018), la guía del exportador de café del International Trade Centre menciona que el café debe contener como mínimo un 50 % del mismo que supere el tamaño 15 de cribado para ser exportable (JAN VAN HILTEN; J. FISHER; A. WHEELER, 2012).

La torrefacción es un proceso de transferencia de calor hacia los granos de café, su factor clave es el suministro controlado de la temperatura durante el proceso y la finalización es precedida por la liberación de los aromas y la coloración homogénea de los granos (ILLY; VIANI, 2005).

El tueste requiere de intercambio de calor entre el tostador y los granos pero simultáneamente conlleva la transferencia masa tanto en forma de vapor como por transformación de la masa seca durante las reacciones químicas, su efecto se puede registrar a través de la cinética de la temperatura del grano, donde los granos son calentados continuamente desde 25 °C hasta alcanzar el nivel de tueste deseado en aproximadamente 235 °C, durante este calentamiento los granos experimentan cambios físicos y químicos, asociados a etapas como el secado, el tueste y el enfriamiento (VARGAS ELÍAS, 2014)

La operación en los tostadores industriales impide la medición de la temperatura en los granos pero sí cuenta con al menos un termómetro en el interior de la cámara generando un perfil de temperatura, conocido como *perfil de tueste*. Los cambios en el interior de la cámara son registrados eficazmente por termómetros termopares donde se describe un enfriamiento exponencial y posteriormente un calentamiento lineal del sistema, esto se puede representar matemáticamente y la ecuación responde a efectos como la variación de la masa de los granos, lo que permite estimar el tiempo del proceso según el nivel de tueste en los granos (ABARCA MORA, 2017).

Según la Asociación Americana de Cafés Especiales (SCAA), en cafés especiales se debe tener mucho cuidado con el nivel de tueste al que se lleva el grano. Entre los estándares propios de la asociación se fija para catación un nivel de tueste de 63,0 asociado a la escala Agtron, lo cual equivale a un tueste “medio”, en este punto se logran apreciar completamente las características organolépticas del café. Entre más claro sea el tueste, más pronunciado será el sabor y la característica que más resaltará es la acidez, sin embargo, el cuerpo será más liviano (SCAA, 2020).

Llevar cafés categorizados como café especial más allá de un nivel medio afecta de forma gradual hasta llegar a un deterioro completo de la calidad, a nivel comercial los cafés de calidad baja se suelen llevar a tuestes moderadamente oscuro hasta muy oscuro, esto se hace con la finalidad de ocultar los defectos, bajar la acidez y darle mayor cuerpo, además se generan contenidos altos de acrilamidas las cuales pueden generar efectos negativos en la salud del consumidor (LANTZ *et al.*, 2006), esto coincide con las recomendaciones hechas por Vargas (2011) donde el nivel de tueste en los granos de un *café especial* debe ser desde *medio claro* a *medio* para mantener una buena puntuación en la bebida y la temperatura de los granos debe ser menor que 233 °C, con duración de 9 a 16 min.

La rapidez en que aumenta la temperatura interna durante el tueste es una característica tanto del equipo como de la materia prima, importancia debido una diferencia de 5 °C en el interior del tostador genera cambios significativos en las propiedades físicas con una tasa de calentamiento uniforme hasta el final del proceso (PORRAS *et al.*, 2019).

El perfil de la temperatura durante el tueste del café tiene potencial para predecir el tiempo de tueste en los granos, asociando tanto las características del tostador como de las propiedades físicas del café lavado; por lo que el objetivo del trabajo fue ajustar un modelo matemático para representar el perfil de tueste en los granos de café natural en tostador convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS: Se utilizaron granos de café (*Coffea arabica* var. Catuaí) de la zona del Valle Occidental de Costa Rica cosecha 2019-2020. El lote proviene de una misma parcela con 30 años de producción y de aproximadamente 5700 m², con elevación promedio de 1250 m.s.n.m. La cosecha fue manual y selectiva del fruto maduro. El secado fue realizado al sol durante 30 días en mesas elevadas con circulación de aire por convección natural, el espesor fue menor a 3 cm. Se utiliza un lote de 12,0 kg de fruto seco y con un 57,2% de rendimiento en café oro. La bebida con los granos obtenidos fue clasificada como *café especial* con evaluación sensorial de 85 puntos según la Asociación Americana de Cafés Especiales (TRAORE; WILSON; FIELDS III, 2018).

Se utilizó el tostador convencional provisto de un cilindro rotatorio perforado a 60 RPM, marca BENDIG y modelo ECO-2000, el calentamiento es generado por la quema de gas propano y tiene una capacidad máxima de 2 kg para café beneficiado. El sistema de enfriamiento es por succión de aire a velocidad constante producida por ventilador centrífugo. Se realizaron 3 tuestes cada uno con 600 g de café, hasta alcanzar la temperatura de 220, 225 y 230 °C. Se utilizó un escáner de temperaturas marca Cole-Parmer Instrument Company, modelo 92000-00 Benchtop 115 V como se muestra en la Figura 1, donde están conectados los cables termopares tipo k en todo el sistema con una frecuencia de registro de cada 10 segundos. El software utilizado para la adquisición de datos a la computadora fue el ScanLink 2.0.

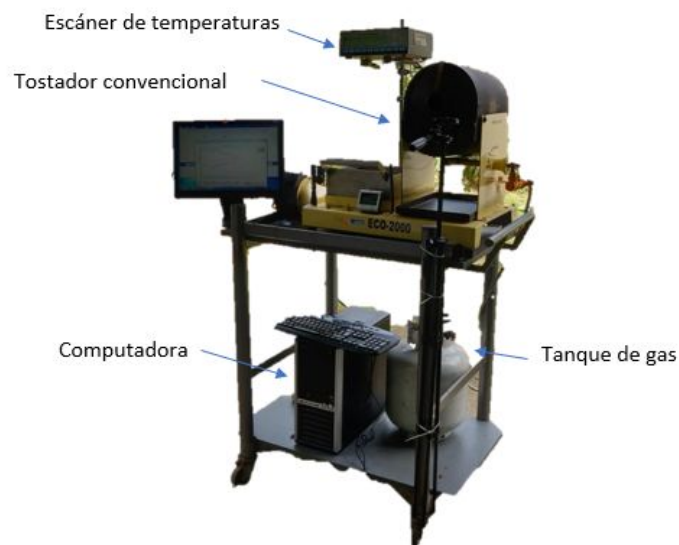


FIGURA 1. Sistema de registro de temperaturas en tostador convencional.

Sistema de aquisição de dados de temperatura no torrador convencional do café.

Se utilizó el software SigmaPlot 14.0 para la determinación de los coeficientes de las ecuaciones por el método de la regresión no lineal a partir de los datos obtenidos en el tueste del café natural. La ecuación de mejor ajuste para describir el perfil de tueste fue seleccionado con el valor de R^2 más cercano a 1, menor error estándar de estimación y aleatoriedad de los residuos en dos ecuaciones usadas en café de calidad especial y en el mismo tostador mostradas en la Tabla 1.

TABLA 1. Ecuaciones para representar el perfil de tueste del café en tostador convencional.
Equações para a representação do perfil da torra no torrador convencional.

Referencia ecuación de perfil de tueste	Modelo
(Abarca, 2017)	$T(t) = a * e^{-k*t} + b * t + c$ (1)
Propuesto	$T(t) = a * e^{-k*t^c} + b * t$ (2)

em que, T - temperatura do interior do torrador ($^{\circ}C$), a , b , c , k são coeficientes dos modelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN: La bebida con los granos obtenidos fue clasificada como *café especial* con evaluación sensorial de 85 puntos según la Asociación Americana de Cafés Especiales (TRAORE; WILSON; FIELDS III, 2018). El lote estudiado presentó la distribución porcentual del tamaño de grano beneficiado según la figura 2.

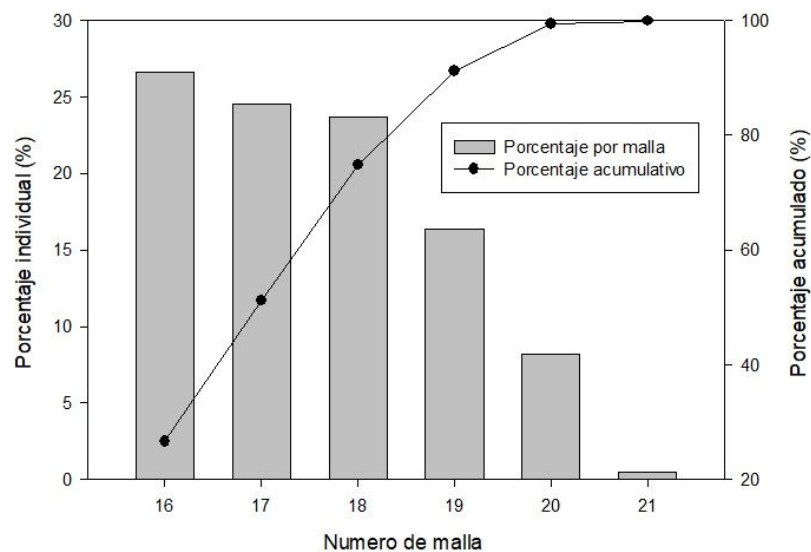


FIGURA 2. Distribución porcentual por tamaño de los granos para café Catuaí cosecha 2019-2020

Distribuição dos grãos de café pelo tamanho na amostra catuaí vermelho na safra 2019-2020

De la totalidad de los granos, el 72,8% se encuentra entre el tamaño 17 y 20. Esto, junto con las otras características mencionadas describen al lote utilizado como un *café especial* de exportación.

De acuerdo a los datos de la figura 3, se observan dos secciones una decreciente y otra creciente. La primera sección decrece exponencialmente, la cual se inicia desde el ingreso del grano de café hasta un punto de inflexión en 188,6 °C obtenido de los datos registrados y la segunda sección crece como una línea recta.

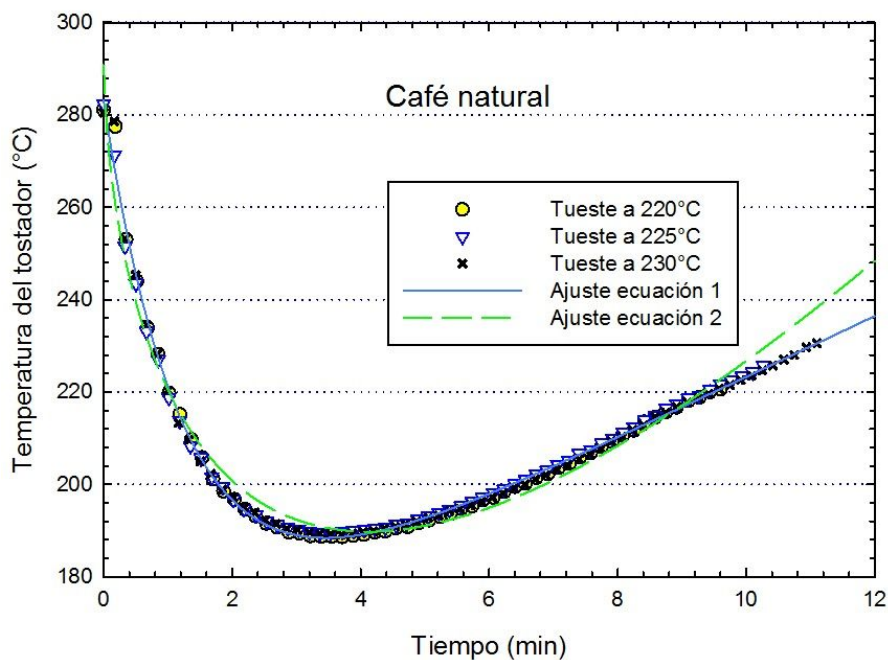


FIGURA 3. Perfil de temperatura durante el tueste de café natural en la variedad catuaí rojo.

Perfil de torra do café natural na variedade catuaí vermelho no torrador convencional.

El ajuste realizado de forma general para los tres niveles de tueste se hizo debido a que era la misma variedad de café y del mismo lote, dejando sólo como variable el nivel de tueste. El tiempo de tueste para los tres niveles estuvo entre 9 a 11 minutos y su masa no llega ni a la mitad de la carga máxima de 2 kg, el cual es más rápido que los tostadores de tambor con cargas máximas desde 12 a 18 min (DE LA CRUZ, 2018). En el caso de tostadores con aire, los coeficientes de transferencia de calor son mucho mayores con tasas de calentamiento mayores respecto a los tostadores tradicionales y por consiguiente disminuye el tiempo de tueste en 5 minutos, mientras que para el tostador convencional se encuentra entre 8 y 20 minutos aproximadamente (BASILE; KIKIC, 2009).

Los modelos no lineales fueron ajustados con coeficientes de determinación (R^2) de 99,49 y 97,06 % para la ecuación 1 y 2 respectivamente. La ecuación 2 no se aproxima eficazmente después de 9 min y sobre 220 °C. Se observó que todo el proceso fue descrito con la ecuación 1 propuesta por Abarca (2017) para café lavado. Se demostró que segmentar el proceso permite una aproximación lineal del calentamiento con coeficiente de determinación de 99,68 % según la Tabla 2.

TABLA 2. Coeficiente las ecuaciones determinadas durante el ajuste del perfil de tueste.

Proceso	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	k (min ⁻¹)	c (°C)	R ² (%)	S.E.E.** (%)
Eq. 1	125,8995	6,6034	0,7844	157,2035	99,49	1,4016
Eq. 2	290,7485	16,2184	0,3531	0,6295 (*)	97,06	3,3724
<i>Final</i>	(°C)	(°C min ⁻¹)				
Lineal	156,3710	6,7313	N.A.	N.A.	99,68	0,5072

^{N.A.}: no aplica; *: adimensional; **: Error Estándar Estimado.

Se observa que la tasa de calentamiento de los granos al final del tueste puede oscilar entre 6,60 y 6,73 °C min⁻¹, el coeficiente *b* del modelo exponencial-lineal es similar al valor determinado por el ajuste lineal. Los resultados de este experimento están de acuerdo con los obtenidos por Abarca (2017) que oscilaron entre 7,85 y 6,73 °C min⁻¹ en masas de 600 y 800 g, respectivamente. La tasa de calentamiento para 600 g fue mayor en Abarca (2017) con respecto a esta investigación y su diferencia se asocia a que los granos tenían menor contenido de humedad (10 % b.h.).

La distribución de los residuos fue aleatoria para las dos ecuaciones según se observa en la Figura 5, se obtuvieron diferencias menores a 5 °C entre los valores observados y los estimados por el ajuste 1, para las temperaturas menores a 260 °C.

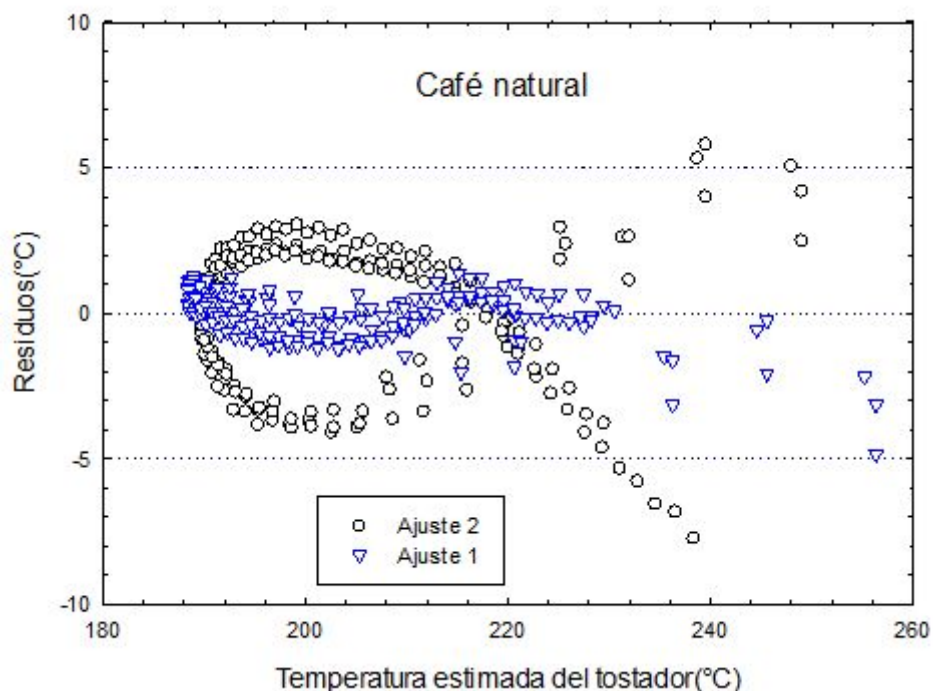


FIGURA 5. Distribución de los residuos para la temperatura del tostador convencional.

Distribuição dos resíduos do modelo de temperatura para o perfil de torra.

La comparación de residuos para determinar la menor magnitud de variación entre modelos fue similar a la utilizada para la selección del modelo de equilibrio para la curva de mejor ajuste de los granos de cacao (VARGAS, 2019).

La ecuación 1 tiene tres términos, uno constante, otro exponencial decreciente y otro lineal ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$). La temperatura del tostador después de 6 min aumenta de una forma principalmente lineal y es similar en los tres niveles de tueste, por lo tanto; se realizó un ajuste general como se observa en la Figura 6.

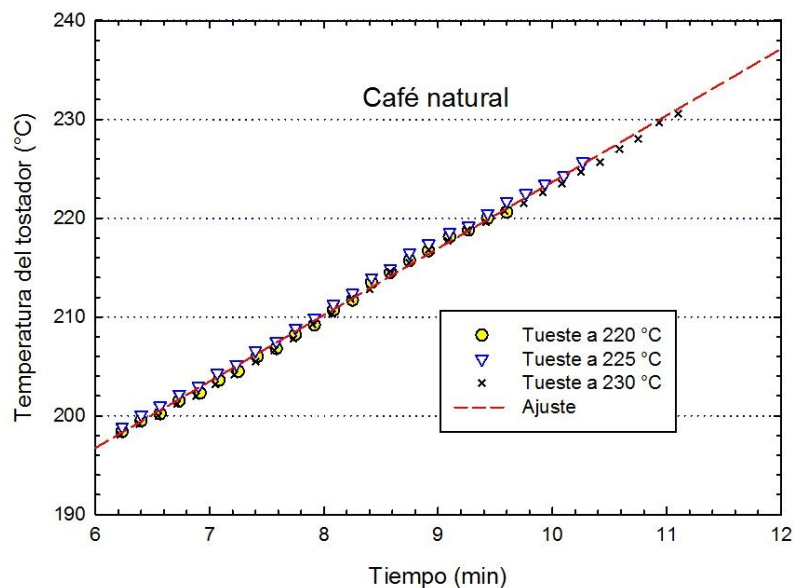


FIGURA 6. Relación de la temperatura al final de la torrefacción de los granos de café natural.

Relação de temperatura no final da torrefação dos grãos de café naturais

Se observó que al final del proceso de torrefacción el calentamiento del sistema es lineal, lo que concuerda con otros trabajos realizados en este tipo de tostador (ABARCA, 2017; PORRAS et al., 2019; VARGAS, 2019). Se determinó que la ecuación general de una línea recta se ajustó adecuadamente con un coeficiente de determinación (R^2) de 99,68 % usando las temperaturas registradas en los tres niveles de tueste en los granos y el calentamiento del sistema ocurrió a una tasa constante de aproximadamente $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Esta función lineal permite la predicción del nivel de tueste en los granos para tostadores industriales tipo convencional, siempre que sea un mismo lote de café.

CONCLUSIÓN: El perfil de temperatura en el tostador convencional se ajusta adecuadamente con el modelo exponencial-lineal de tres términos para el tueste de los granos de café natural. La sección lineal del perfil de tueste predice la temperatura y el tiempo de tueste a partir de una tasa constante de aproximadamente $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

AGRADECIMIENTOS: A la empresa familiar Aromas del Alto en Naranjo de Alajuela por el suministro de las muestras.

REFERENCIAS:

- ABARCA M., R. **Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional**. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agrícola, UCR. San José, C.R. 2017. Disponible em: <<http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352>>. Acceso em: mar. 2020.
- BASILE, M.; KIKIC, I. A lumped specific heat capacity approach for predicting the non-stationary thermal profile of Coffee during roasting. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 23, n. 2, p. 167–177, 2009.
- DE LA CRUZ, Rafael. Influencia del tipo de perfil de tostado del café en la calidad en taza para una tostadora de. Universidad Nacional del Perú, 2018. Disponible em: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4977/T010_20018944_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- DE LUCA, Silvia; DE FILIPPIS, Martina; BUCCI, Remo; et al. Characterization of the effects of different roasting conditions on coffee samples of different geographical origins by HPLC-DAD, NIR and chemometrics. **Microchemical Journal**, v. 129, p. 348–361, 2016. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2016.07.021>>.
- ILLY, Andrea; VIANI, Rinantonio. **Espresso Coffee: The science of quality**. [s.l.: s.n.], 2005.
- LANTZ, I.; TERNITÉ, R.; WILKENS, J.; HOENICKE, K.; GUENTHER, H.; VAN DER STEGEN, G. H. D. Studies on acrylamide levels in roasting, storage and brewing of coffee. *Molecular Nutrition and Food Research*, v. 50, n. 11, p. 1039–1046, 2006. Disponible em: <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600069>
- PALUNGAN MUSA, B.; RAPA CHARNIA, I.; SALMA, S. The effect of temperature and duration roasting of the physical characteristics of Arabica Coffee. **Materials Science Forum**, 967, 113-117. Aug, 2019.
- PORRAS Z., M.; VARGAS-ELÍAS, G.; ARAÚZ M., L.; ABARCA A., Y. Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café. **Revista Tecnología en Marcha**, v. 32, n. 7, p. Pág. 20-27, 23 abr. 2019. Disponible em: <<http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/77302>>. Acceso em: mar. 2020.
- SUALEH, Abrar; MEKONNEN, Negussie. **Manual for coffee quality laboratory**. Addis Ababa: Ethiopian Institute of Agricultural Research, 2015. Disponible em: <http://publication.eiar.gov.et:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/152/coffee%20quality%20manual.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- TRAORE, Togo M.; WILSON, Norbert L. W.; FIELDS III, Deacue. What explains specialty coffee quality scores and prices: A case study from the cup of excellence program. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 50, n. 3, p. 349–368, 2018. DOI: 10.1017/aae.2018.5. Disponible em: https://www.researchgate.net/publication/324484646_What_explains_specialty_coffee_quality_scores_and_prices_A_case_study_from_the_cup_of_excellence_program.

VARGAS-ELÍAS, G. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação.** 2011. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3458.3446>

VARGAS-ELÍAS, Guillermo Asdrúbal. **Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação.** 2014. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa..

<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/18544>

VARGAS F., R. **Análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la torrefacción de los granos de cacao.** Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agrícola, UCR. San José, C.R. 2019. Disponível em: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/79255> > Acesso em: mar. 2020.

DERIBE, Habtamu. Review on Factors which Affect Coffee (Coffea Arabica L.) Quality in South Western, Ethiopia. **International Journal of Forestry and Horticulture**, v. 5, n. 1, p. 12–19, 2019. DOI: 10.20431/2454-9487.0501003. Disponível em: <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijfh/v5-i1/3.pdf>.

ICO. **National Quality Standards Background.** Londres. 2018. Disponível em: <http://www.ico.org/documents/cy2017-18/icc-122-12e-national-quality-standards.pdf> <<http://www.ico.org/documents/cy2017-18/icc-122-12e-national-quality-standards.pdf>> Acesso em: mar. 2020.

JAN VAN HILTEN, Hein; J. FISHER, Paul; A. WHEELER, Michael. **The Coffee Exporter's Guide.** 3. ed. Geneva: ITC, 2012. DOI: 10.18356/a556dbd7-en. Disponível em: <http://www.intracen.org/The-Coffee-Exporters-Guide-Third-Edition/>.

