



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 19 de enero de 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

LEIDY TATIANA CAMPO HÓMEZ, con C.C. No. 1.075.217.709,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado INFLUENCIA DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN TOSTADOR ROTATORIO EN EL CONTENIDO DE COMPUESTOS QUÍMICOS Y PERFIL SENSORIAL DEL CAFÉ presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología del Café;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: INFLUENCIA DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN TOSTADOR ROTATORIO EN EL CONTENIDO DE COMPUESTOS QUÍMICOS Y PERFIL SENSORIAL DEL CAFÉ

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CAMPO HÓMEZ	LEIDY TATIANA

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
BUSTOS VANEGAS	JAIME DANIEL

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magíster en Ciencia y Tecnología del Café

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Maestría en Ciencia y Tecnología del Café

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 18

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías_X__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros_X_



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: No

MATERIAL ANEXO: No

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

- | | |
|------------------------|-------------------|
| 1. Café | Coffee |
| 2. Tueste | Roast |
| 3. Ácidos Clorogénicos | Chlorogenic acids |
| 4. Cafeína | Caffeine |
| 5. Trigonelina | Trigonelline |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La evolución de la temperatura del grano de café durante el proceso de tueste determina la calidad físico-química y sensorial de la bebida. El control de esta variable se realiza en tostadores de tambor rotatorio a través de la manipulación del flujo de aire y potencia del quemador. En esta investigación se analizó la influencia de estos dos parámetros de operación en el perfil sensorial y contenido de principales compuestos bioactivos del café tostado. Los compuestos analizados no registraron variaciones estadísticamente significativas para un café de especialidad; concluyéndose que los resultados obtenidos para el diseño propuesto pueden formar parte de futuros estudios enfocados a la optimización de procesos con ahorros energéticos y económicos



relacionados a menores tiempos de tueste y diseño de perfiles sensoriales con mayor complejidad aromática, intensidad y calidad en acidez y cuerpo.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The evolution of the coffee bean temperature during the roasting process determines the physicochemical and sensory quality of the beverage. The control of this variable is carried out in rotary drum roasters through the manipulation of air flow and burner power. In this research the influence of these two operating parameters on the sensory profile and content of the main bioactive compounds of roasted coffee was analyzed. The compounds analyzed did not register statistically significant variations for a specialty coffee; concluding that the results obtained for the proposed design can form part of future studies focused on the optimization of processes with energy and economic savings related to shorter roasting times and the design of sensory profiles with greater aromatic complexity, intensity and quality in acidity and body.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Claudia Milena Amorocho Cruz

Firma:

Nombre Jurado: Miguel Angel Díaz Herrera

Firma:

Influencia de parámetros de operación de un tostador rotatorio en el contenido de compuestos químicos y perfil sensorial del café

Leidy Tatiana Campo Hómez¹, Jaime Daniel Bustos Vanegas²

RESUMEN

La evolución de la temperatura del grano de café durante el proceso de tueste determina la calidad físico-química y sensorial de la bebida. El control de esta variable se realiza en tostadores de tambor rotatorio a través de la manipulación del flujo de aire y potencia del quemador. En esta investigación se analizó la influencia de estos dos parámetros de operación en el perfil sensorial y contenido de principales compuestos bioactivos del café tostado. Los compuestos analizados no registraron variaciones estadísticamente significativas para un café de especialidad; concluyéndose que los resultados obtenidos para el diseño propuesto pueden formar parte de futuros estudios enfocados a la optimización de procesos con ahorros energéticos y económicos relacionados a menores tiempos de tueste y diseño de perfiles sensoriales con mayor complejidad aromática, intensidad y calidad en acidez y cuerpo.

ABSTRACT

The evolution of the coffee bean temperature during the roasting process determines the physicochemical and sensory quality of the beverage. The control of this variable is carried out in rotary drum roasters through the manipulation of air flow and burner power. In this research the influence of these two operating parameters on the sensory profile and content of the main bioactive compounds of roasted coffee was analyzed. The compounds analyzed did not register statistically significant variations for a specialty coffee; concluding that the results obtained for the proposed design can form part of future studies focused on the optimization of processes with energy and economic savings related to shorter roasting times and the design of sensory profiles with greater aromatic complexity, intensity and quality in acidity and body.

1. Introducción

La producción de café en Colombia con fines comerciales cita sus inicios por la FNC (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia & Cenicafé, 2013) desde 1810 con el cultivo de variedades de porte alto como Típica, transitando hacia los años 1970 y 1990 a sistemas intensivos a plena exposición solar, como la variedad Colombia, que permite mayores densidades de siembra, y que viene apalancado un incremento en la producción de café. Según los datos estadísticos reportados por FNC, en Colombia se produce café en 23 de los 32 departamentos que conforman su distribución geográfica, centrando el 80% de su producción en 8 departamentos, donde el Huila a partir del 2012 se ha convertido en el mayor productor con una participación del 17%.

Colombia en los últimos 5 años ha registrado una producción anual de aproximadamente 13.628.000 sacos de 60 kg de café verde, de los cuales el 92,5% es destinado a exportación y solo el 0,9% corresponde a exportaciones tipo tostado en grano y/o molido. Este escenario permite identificar una necesidad y oportunidad de generación de valor en la cadena de transformación del café a través del estudio metódico de los fenómenos físicos y químicos asociados a la operación de tostado. El conocimiento profundo de esta etapa del proceso de transformación permitirá el desarrollo de técnicas y tecnologías propias, que incentiven el consumo interno y exportación de café procesado.

En el proceso de tueste, los granos de café verde se convierten a granos de color marrón, al pasar por las etapas de secado, Maillard y desarrollo y alcanzar temperaturas superiores a 160 °C (Strezov & Evans, 2005; Pantaleo et al., 2017). Durante la serie de transformaciones físicas y químicas ocurridas durante el proceso, se han logrado identificar más de ochocientos compuestos, entre antioxidantes, productos de la reacción de Maillard y compuestos volátiles (Pastoriza & Rufián-Henares, 2014; Schwartzberg, 2013).

La composición del café ha generado un interés en el estudio de compuestos bioactivos como ácidos clorogénicos, cafeína y trigonelina, dada su relación con efectos beneficiosos para la salud (Hečimović et al., 2011; Jeszka-Skowron et al., 2020). Estas propiedades, así como el perfil sensorial,

son influenciadas por las condiciones operacionales del tueste, en particular por el tiempo, temperatura (entendida como la temperatura final y su tasa de incremento durante el proceso) y mecanismos actuando en la transferencia de calor (conducción, radiación y convección) (Baggenstoss et al., 2008). El control del proceso se realiza mediante el seguimiento de la temperatura de la masa de granos en una curva de tueste, donde la tasa de incremento de esta variable (ROR por sus siglas en inglés) durante cada una de las etapas del proceso, define su duración e influye en las características físicas, químicas y sensoriales del café tostado. La tasa de incremento (RoR) permite visualizar la evolución de la temperatura del grano durante el tueste, sirviendo de guía para regular el flujo de calor (a través del quemador o ventilación) y así evitar defectos asociados al tueste tales como “grano poco desarrollado” o “café cocido”. La curva de tueste es una herramienta que permite por una parte identificar cuales atributos podrían resaltar en la bebida, y por otra, realizar una estimativa del consumo de energía durante el proceso, al evaluar el área bajo la curva (AUC). Según Pantaleo et al. (2017), por cada kg de café a tostar se requieren aproximadamente 1600 kJ de energía, de los cuales el 75% se pierde en la forma de calor a través de las paredes del tambor y en el aire de salida.

Aunque la influencia del tiempo y temperatura final del proceso de tostado sobre los atributos sensoriales y calidad de la bebida ha sido ampliamente estudiada (Aliah et al., 2015; Hu et al., 2020; Strezov y Evans, 2005), existe un vacío de información relacionada con el impacto de las condiciones de operación sobre las curvas de tueste y consecuentemente sobre la calidad de la bebida. El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia del flujo de aire y del flujo de calor actuando en un tostador de tambor rotatorio sobre el contenido de ácidos clorogénicos, cafeína, trigonelina y perfil sensorial del café tostado.

2. Metodología

2.1. Materia prima.

El estudio se realizó con café variedad Colombia cosechado en la finca “La Florida” ubicada en Gigante (Huila, Colombia) a una altura de 1.650 m.s.n.m. El café fue sometido a un proceso de beneficio húmedo con 30 horas de fermentación. Después de la trilla el café en verde se estabilizó manteniendo un almacenamiento en bolsas GrainPro con cincho durante 80 días a condiciones controladas de laboratorio (T: 27°C y HR: 54%).

Para el proceso de tueste fueron seleccionados granos retenidos por encima de malla 16 (NTC 5248) y se realizó análisis de defectos tomando como referencia la Guía de defectos del café verde Arábica de la SCA. La densidad aparente fue de 720 g/L y humedad inicial de 11% b.h.

2.2. Proceso de tueste

El proceso de tueste se realizó en el laboratorio del Centro Surcolombiano de Investigación en Café “CESURCAFÉ” en un tostador de tambor rotatorio marca Prisma, de 1 kg de capacidad y, equipado con controles manuales para el flujo de aire, intensidad de llama (presión del quemador) y velocidad de rotación del tambor. El sistema cuenta también con una bandeja de enfriamiento y sensores de temperatura ubicados en el seno de la masa de granos y en el ducto de salida de aire (Figura 1). La presión del quemador puede ser regulada entre 0 y 50 mbar. El flujo de aire es controlado a través de una válvula de mariposa que permite su salida total o parcial del sistema. La válvula al 100% indica una extracción total del aire, mientras que un valor de 0% indica una recirculación total al sistema. Para el registro de curvas y parámetros de tueste fue acoplado un PC vía Artisan v3.0. Durante el tostado fueron mantenidas condiciones ambientales reguladas (T:26°C y HR: 47%-52%).



Figura 1. Tostador Prisma CESURCAFE, control de presión de gas y control del flujo del aire

En ensayos preliminares se definieron como parámetros constantes de operación la velocidad del tambor (60 RPM), el tamaño del bache (1 kg) y la temperatura de cargue (del tambor) (180°C). Las condiciones iniciales para el flujo de calor y flujo de aire fueron mantenidas para todos los tratamientos en 17,5 mbar de presión del quemador y 40% de salida de flujo de aire. Objetivando conservar un RoR decreciente durante todo el proceso de tueste, la potencia del quemador fue disminuida a presión de 12,5 mbar, mientras que la salida de aire fue aumentada para 70%. Se definieron 3 instantes de tiempo diferentes para la actuación sobre cada uno de estos factores, resumiendo en un diseño experimental de un bloque con 9 niveles (Figura 2). Al inicio de cada jornada de tueste, dos baches de purga fueron realizados con el objetivo de limpiar el equipo y estabilizarlo térmicamente. Todas las curvas se realizaron por triplicado y concluyeron al alcanzarse un nivel de tueste claro verificado de manera visual, toda vez que como lo expresan (Sacchetti et al., 2009) y (Fabbri et al., 2011) el color es el parámetro más utilizado para definir el nivel de tueste. Una vez los granos alcanzaron el grado de tueste deseado, la masa de granos tostados fue descargada y enfriada en la bandeja mediante un flujo de aire. De esta forma las reacciones exotérmicas dentro del grano son detenidas (Toci et al., 2020).

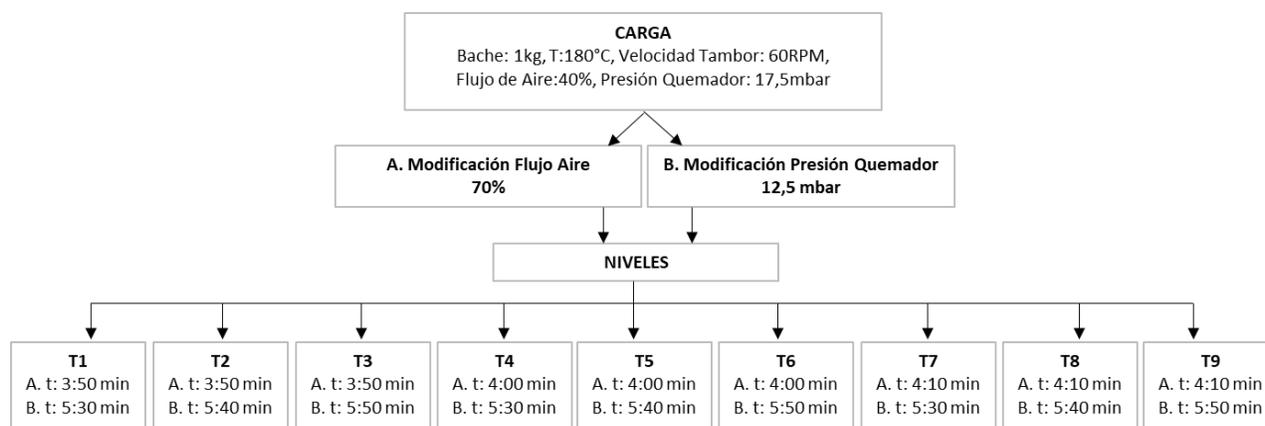


Figura 2. Diseño Experimental, niveles del tratamiento

2.3 Mediciones físicoquímicas

Se realizaron mediciones de peso y volumen para determinar densidad aparente, pérdida de masa y expansión volumétrica del café tostado siguiendo la metodología adoptada por Bustos-Vanegas et al., (2018). Así mismo, se determinó en un colorímetro CR410 (Konica Minolta; iluminante xenón pulsante y ángulo de visión 0°) la representación del color en el espacio CIE $L^*a^*b^*$ (CIE, Commission Internationale d'Eclairage), donde el componente L^* representa la luminosidad y es el indicativo de color para el presente estudio (Schwartzberg 2013).

2.4 Análisis sensorial

En este estudio se aplicó el protocolo de análisis sensorial SCA (Specialty Coffee Association, 2013) con un panel entrenado de cuatro catadores que pertenecen al Centro Surcolombiano de Investigación en Café como lo referencia Cortés Macías et al., (2018). Se realizaron dos sesiones con muestras de ensayos preliminares para familiarizar a los evaluadores con los atributos alcanzados y finalmente dos sesiones para evaluar las muestras de café correspondientes al diseño experimental.

2.5 Determinación de cafeína, ácidos clorogénicos y trigonelina

La cuantificación de cafeína, ácidos clorogénicos y trigonelina de los extractos de café tostado se analizaron en un sistema de HPLC (Agilent 1260 HPLC Infinity II), con una columna de separación

Poroshell 120 EC-C18 de 2,7 μm , 2,1 x 150 mm (Agilent) y una precolumna correspondiente, con un caudal de 0,3 ml/min. Se generó una extracción en medio acuoso (Agua destilada tipo II) e infusión en baño maría a 92°C por 15 min pasando por un filtro de nylon de 0,2 μm a viales de 1,5 ml. La separación de compuestos se realizó siguiendo la metodología definida por Smrke et al., (2015) a partir de una elución de gradientes lineales de las fases móviles A (agua: metanol 90: 10 (v/v) con 0,1% de ácido fórmico) y B (agua: metanol 5: 95 (v/v) con 0,1% de ácido fórmico) y la cuantificación mediante un detector DAD comparando el tiempo de retención y el área del pico de los estándares a las mismas condiciones de calibración (275 nm para cafeína, 325 nm para ácidos clorogénicos y 268 nm para trigonelina).

3.1 Análisis estadístico

Los valores medios de las variables físico-químicas analizadas se compararon mediante un análisis de varianza simple con un nivel de confianza del 95% y prueba de rangos múltiples de Fisher empleando el programa Statgraphics Centurion XV.II para Windows.

3. Resultados y Discusión

3.1 Perfil de Tueste y propiedades físicas

Los 9 baches que representaban los niveles diseñados contaban con estrategias de tueste levemente diferenciadoras. Todos los perfiles alcanzaron temperaturas finales próximas a los 190 °C en tiempos que oscilaron entre 6,4 y 8,2 minutos. En la tabla 1 se presentan los valores obtenidos para luminosidad, pérdida de peso, porcentaje de expansión, tiempo de tueste, temperatura final y área bajo la curva (AUC) en los 9 niveles testados. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para los parámetros color (L^*), tiempo de tueste y área bajo la curva (AUC), obedeciendo en primera medida a que la finalización del proceso se realizó con una referencia visual, tal como se realiza en la práctica industrial, lo cual puede dar lugar a errores (Hernández 2018); sin embargo, los valores medios obtenidos para luminosidad (L^*) y pérdida de peso en cada uno de los niveles se asociaron a un grado de tueste claro, de conformidad a lo expresado por Schwartzberg (2013) y Rao (2014).

Tabla 1. Mediciones en los niveles de tueste de café

Nivel	L* Tostado	SD	Pérdida Peso %	SD	Tiempo Tueste (min)	SD	AUC (C*Min)	SD	T Final Tueste (°C)	SD	Expansión Volumétrica (%)	SD
T1	30,13	0,25	-14,03	0,02	6,59	0,38	289,00	7,81	190,37	0,23	65,52	1,48
T2	30,52	1,25	-13,89	0,61	6,40	0,05	280,33	17,50	189,67	3,51	62,34	2,16
T3	31,37	1,45	-13,62	0,34	7,18	0,11	318,67	13,20	189,87	2,14	56,90	5,16
T4	30,52	0,32	-13,75	0,67	7,29	0,02	335,00	14,18	190,67	2,42	56,54	7,37
T5	30,99	0,82	-13,97	0,10	7,93	0,93	355,00	23,07	191,00	1,06	63,09	2,88
T6	30,68	1,03	-13,99	0,49	8,18	0,06	363,67	7,09	190,40	1,48	61,36	1,70
T7	31,80	0,63	-13,71	0,17	7,92	0,43	349,67	12,06	190,00	0,40	62,49	1,98
T8	30,85	1,04	-13,94	0,64	7,43	0,06	339,33	12,50	190,33	1,33	57,73	3,51
T9	32,63	0,34	-13,58	0,04	7,81	0,36	332,33	5,69	188,77	0,65	60,84	1,85
Promedio	31,05	1,12	-13,83	0,39	7,41	0,67	329,22	29,69	190,12	1,61	60,76	4,23

El tueste es un proceso en el que la diferencia de temperatura entre el medio y el grano de café propicia una transferencia de energía en la forma de calor hacia el interior del grano. El incremento de la energía interna estimula la migración de humedad desde el centro hacia la superficie del grano, donde finalmente se pierde en forma de vapor de agua. Dióxido de carbono y otros compuestos volátiles también son formados y liberados durante el proceso, incrementando la presión al interior de la matriz sólida del grano y provocando su expansión. Cuando la transferencia de calor se da en periodos cortos (con altas temperaturas) la tasa de pérdida de masa (en forma de vapor de agua, CO₂ y volátiles) se incrementa, provocando un aumento de la presión y mayor expansión de la estructura del grano. Bustos-Vanegas et al., (2018) señalan una relación directamente proporcional entre la temperatura final y el porcentaje de expansión volumétrica; en el presente estudio las temperaturas finales fueron moderadas y no presentaron diferencias significativas, por lo que los diferentes porcentajes de expansión observados en los granos pueden ser debidos a las diferencias en los tiempos de proceso. Aunque las observaciones no permiten establecer una correlación, los mayores porcentajes de expansión (65,5 y 62,3%) coinciden con los perfiles más cortos (6,5 y 6,4 minutos).

En la figura 3 se presentan los porcentajes de tiempo transcurrido en las etapas de secado, Maillard y desarrollo para cada uno de los niveles testados. De forma general, se espera que tiempos prolongados en la etapa de Maillard resalten notas de origen como frutales y florales. La extensión de la etapa de desarrollo promueve notas asociadas a la caramelización de azúcares, chocolate y disminución de acidez. En la etapa de secado ocurre básicamente liberación de vapor de agua. El carácter endotérmico de la evaporación ayuda a proteger la estructura del grano conservando los compuestos precursores de aromas hasta la etapa de Maillard. Como se presenta en la figura 3, se puede observar que los perfiles con mayor tiempo de secado corresponden a los niveles T1 y T2 con aproximadamente 46% del total del tiempo de proceso, lo que pudo influenciar en el mayor porcentaje de expansión ocurrido en estos perfiles.

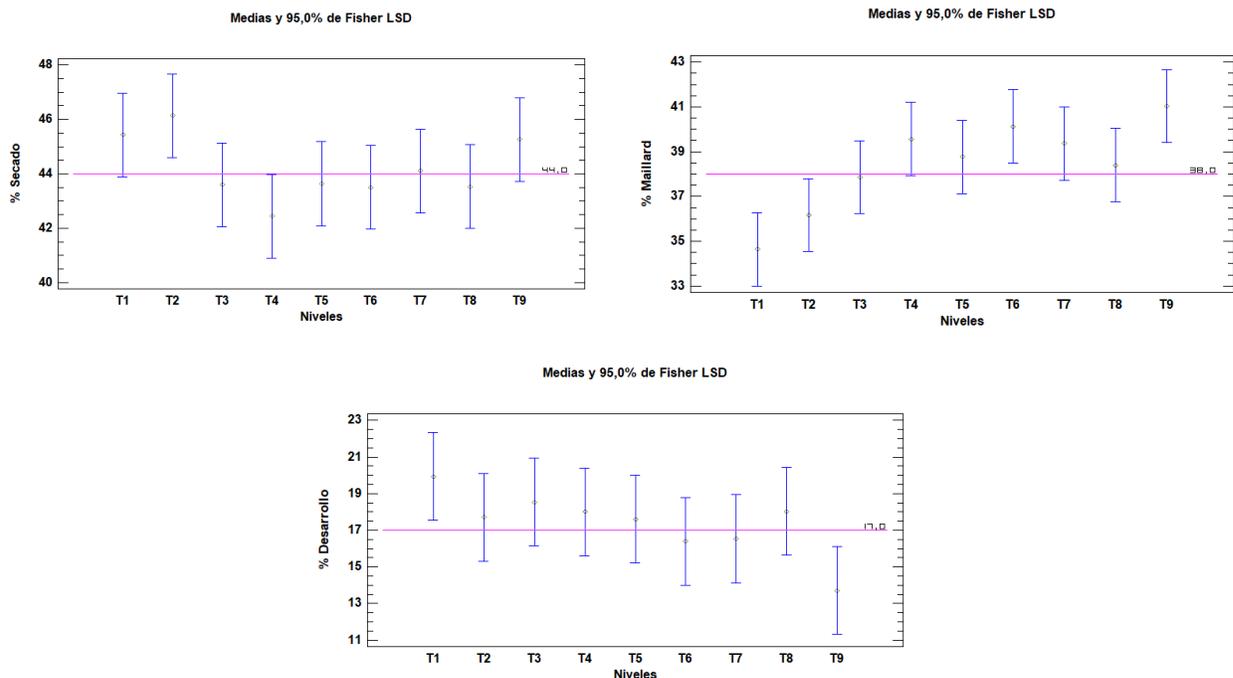


Figura 3. Fases de tueste en los 9 niveles

El valor AUC de un perfil de tueste está relacionado con la energía térmica incorporada a la masa de granos, por lo que puede ser un indicador del consumo de energía del equipo. Como se esperaba,

se observó mayor demanda de energía para tuestes largos y se logró establecer una relación estadísticamente significativa entre AUC (C*min) y Tiempo Tueste (min) ($p < 0,05$) ajustándose al siguiente modelo lineal: $AUC (C*min) = 33,8462 + 39,8439 * \text{Tiempo Tueste (min)}$.

En la figura 4 se presenta el perfil de tueste obtenido a través del software Artisan para el nivel T1 en una de sus réplicas. En el perfil se resumen informaciones importantes relacionadas con la variación de parámetros de operación (potencia del quemador y flujo de aire), etapas del proceso y temperaturas de la masa de granos y del aire, así como sus tasas de incremento (RoR). Mientras que la temperatura de cargue del equipo fue estabilizada en 180 °C, la temperatura inicial de la masa de granos corresponde a la temperatura de equilibrio con el ambiente (26°C). Al cargar el tambor con la masa de café verde, el proceso de transferencia de calor da inicio y se puede observar una caída en la temperatura del equipo (BT). La temperatura de la masa de granos no se registra hasta que su valor iguala la temperatura del tostador (109,9 °C). A partir de este momento, la temperatura del tambor y de la masa de granos se asumen iguales (BT). La masa de granos continúa experimentando un incremento de su energía interna con una tendencia desacelerada (RoR) controlada por la disminución de la potencia del quemador y por la apertura de la válvula para salida de aire. La curva RoR para el aire es más sensible a los cambios en los parámetros de operación, evidenciando un rápido incremento al aumentar el flujo de salida de aire y una rápida caída al disminuir la potencia del quemador.

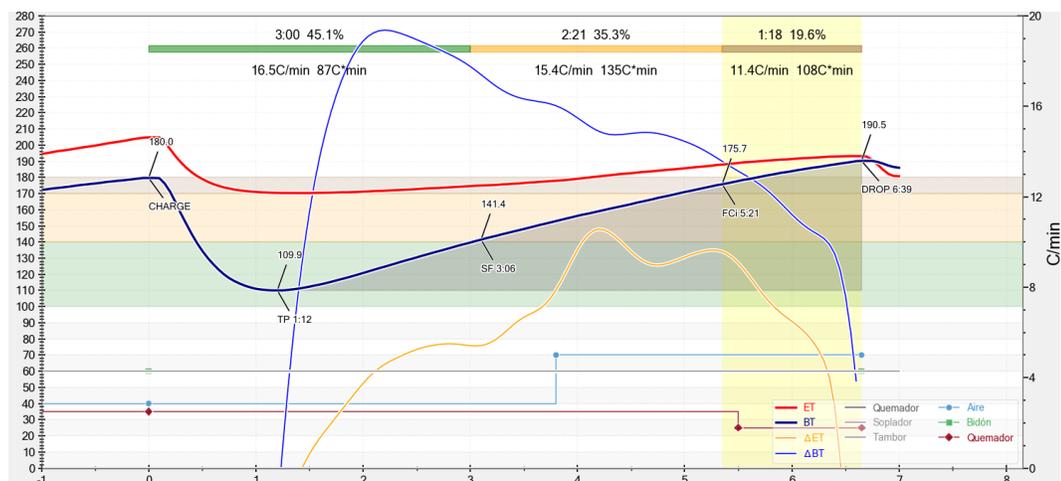


Figura 4. Perfil de tueste para el nivel T1 en una de sus réplicas. BT: temperatura de la masa de granos. ET: temperatura del aire de salida del tambor. Δ BT: RoR masa de granos. Δ ET: RoR aire.

Las curvas donde la temperatura del aire y del tambor fueron muy cercanas durante el cargue, se trasladaron justo después del primer crack, indicando que el mecanismo dominante de transferencia de calor durante la fase de desarrollo pasó a ser la conducción (Figura 3), tal como sucede durante los primeros minutos, toda vez que la convección domina a medida que la temperatura del aire en el tostador se recupera tras su caída inicial. Este fenómeno se observa en la Figura 5 y repercute en una etapa de desarrollo muy corta, como se verificó en la figura 3.

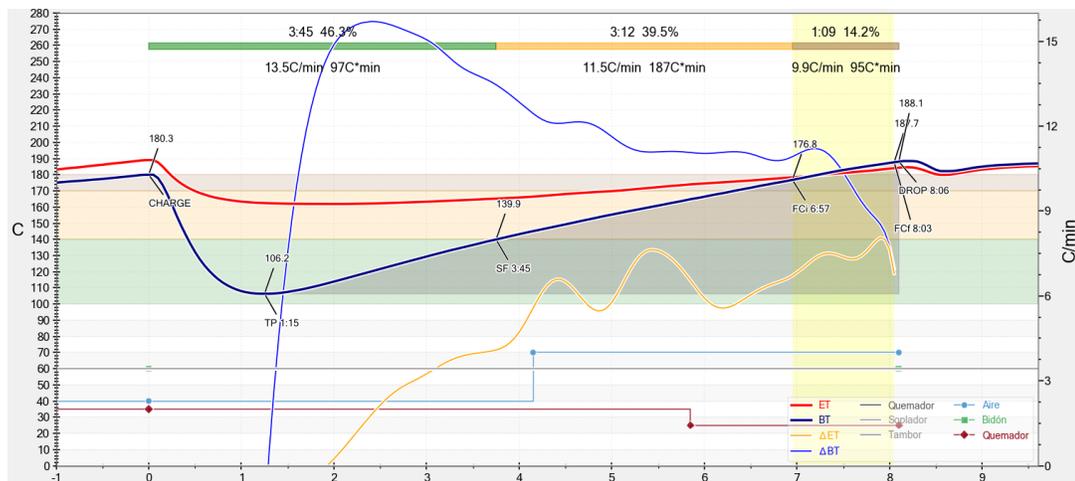


Figura 5. Perfil de tueste para el nivel T9 en una de sus réplicas. BT: temperatura de la masa de granos. ET: temperatura del aire de salida del tambor. Δ BT: RoR masa de granos. Δ ET: RoR aire.

3.2 Perfil Sensorial

Los datos generados a partir del análisis sensorial mostraron la atipicidad en algunas muestras que reportaron defectos en taza relacionados al proceso de cosecha y postcosecha; por tanto, no se tuvieron en cuenta para el presente análisis. El puntaje de taza en los 9 niveles del tratamiento no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$); con una media de 83,5 (Figura 6), lo cual lo cataloga como café especial, según lo referenciado en el protocolo de análisis sensorial SCA.

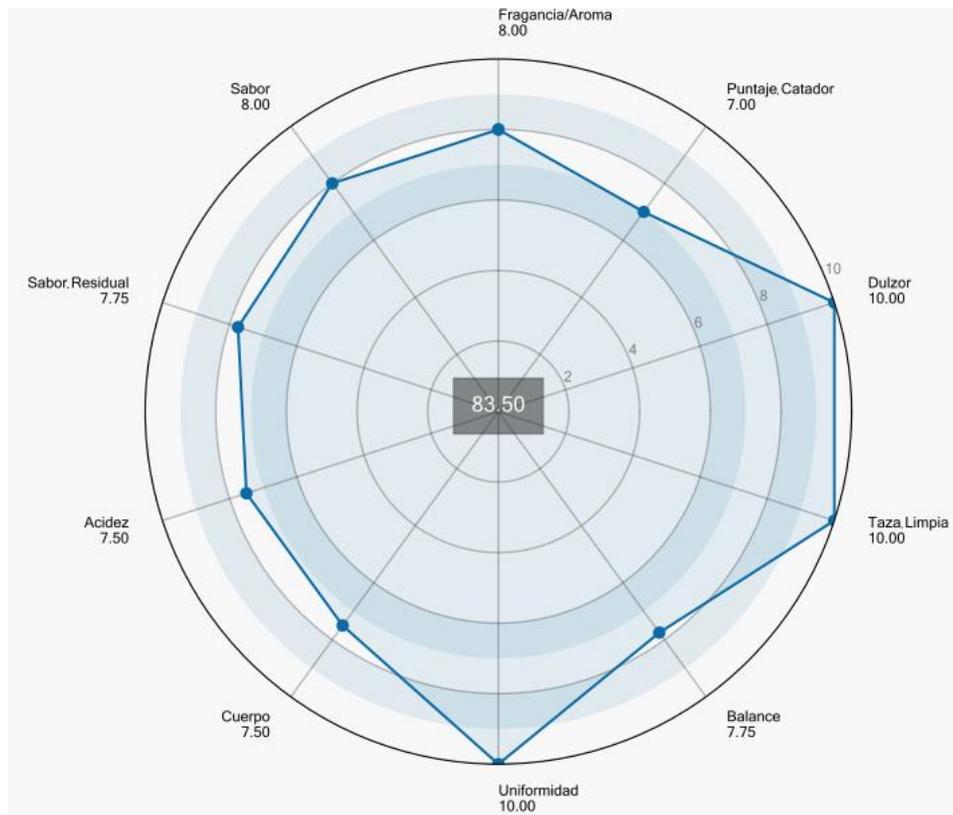


Figura 6. Perfil sensorial de la media estadística de todos los niveles

Con los niveles de tueste propuestos se logró mantener un tueste consistente frente a un perfil sensorial de café tipo especialidad con atributos sensoriales característicos de la variedad en estudio (Chocolate, dulce, afrutado) y del nivel de tueste alcanzado que como menciona Rao (2014) suele ser jugoso, con aromas florales y afrutados, toques de caramelo y cuerpo ligero, llegando en ciertas ocasiones a ser herbáceo y alimonado, como ocurre con el nivel T9, que alcanzó un puntaje de 84 (Figura 7).

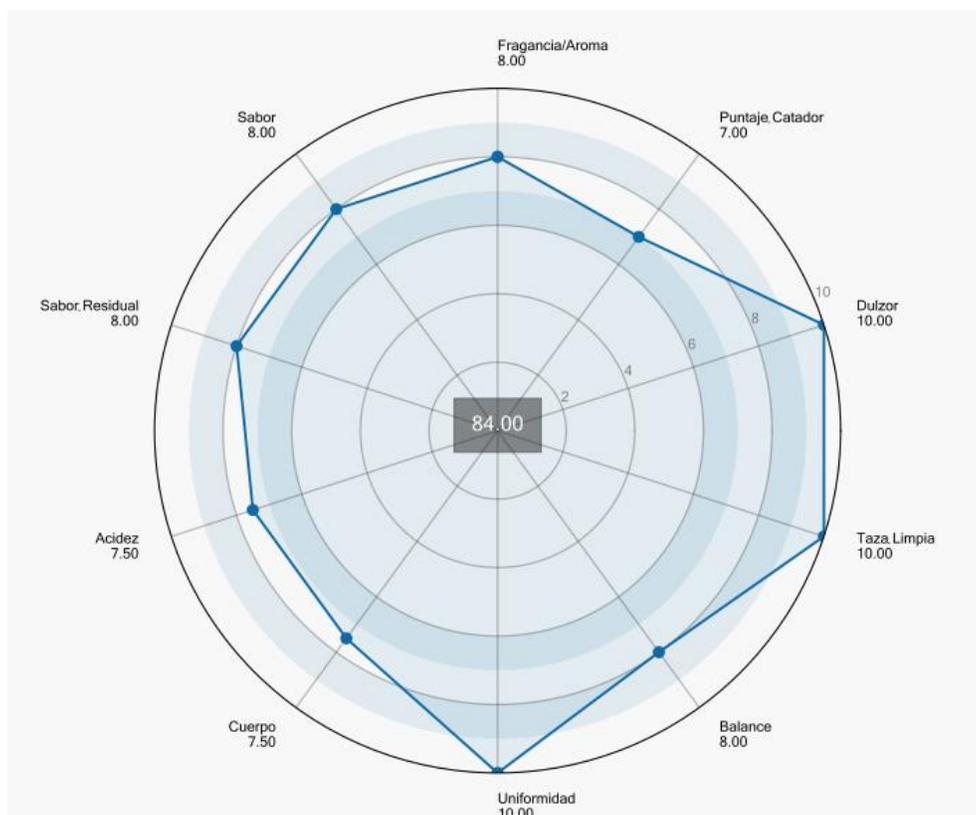


Figura 7. Perfil sensorial del nivel 9

Los ácidos clorogénicos de la infusión de café son los responsables del aroma y la astringencia (Jeszka-Skowron et al., 2015); con lo cual se esperaba que los cafés con mayor presencia de ácidos clorogénicos representaran un aumento de la astringencia (DiDonfrancesco, Gutiérrez Guzmán y Chambers, 2014); lo cual no sucedió para el presente estudio, puesto que los niveles T5, T7, T9 que describieron astringencia no reportaron el mayor contenido de ACG's (Ácidos Clorogénicos). Sin embargo, los niveles T5, T7 y T9 sobresalieron frente al resto de niveles porque desarrollaron una mayor intensidad y calidad en acidez (media alta) y cuerpo (alto), muy relacionadas con una actuación en el flujo de aire más tardía (4:10 min), con lo cual se prevé un menor arrastre de componentes volátiles. La actuación en la potencia del quemador resultó ser mucho más apropiada a los 5:50 min, y para el nivel T9, resultó en una fase de Maillard más prolongada (Figura 5), lo que potenció la complejidad aromática expresando notas a especias, chocolate amargo y cuerpo sedoso (Hoos, 2015).

En otros estudios se ha demostrado que la cafeína contribuye sólo en una proporción relativamente pequeña (10%) del amargor percibido (Osorio et al., 2021), por tanto, en este estudio no es considerado como parámetro asociativo.

3.3 Contenido Químico

Las reacciones químicas generadas durante el proceso de tueste del café están enmarcadas por los precursores que son propios de la variedad y procesos de cosecha y postcosecha; sin embargo, la temperatura y el contenido de agua presente en cada etapa del tueste se convierte en una matriz para la sucesión de cada una de ellas (Maillard, degradación de Streck, pirólisis, caramelización), dando lugar principalmente a compuestos como fenoles, alcaloides, aromáticos y de color (SCHENKER, 2000). Para el caso de nuestro estudio los resultados obtenidos del análisis de ACG's, cafeína y trigonelina reportados en la tabla 2, permitieron observar que las variaciones efectuadas en los parámetros de operación seleccionados no generaron efecto estadísticamente significativo ($p > 0,05$) sobre estos.

Tabla 2. Contenidos según media estadística, expresados en mg/g

Nivel	ACG	SD	Cafeína	SD	Trigonelina	SD
T1	16,18	7,06	15,11	6,59	10,65	4,97
T2	18,35	5,97	16,01	4,30	12,13	3,27
T3	17,03	2,02	15,30	1,13	11,61	1,28
T4	21,67	5,71	19,58	4,82	14,74	3,54
T5	15,09	0,50	13,54	0,66	12,00	4,10
T6	15,03	2,26	13,68	1,14	10,19	1,13
T7	15,69	1,12	13,94	0,82	10,31	0,66
T8	15,01	1,05	13,35	0,24	9,97	0,18
T9	17,53	2,67	14,78	2,19	11,16	1,82
Promedio	16,84	4,15	15,09	3,55	11,42	2,95

Consecuentemente, el contenido de ACG's se encontró dentro del rango ($5,26 \pm 0,09$ y $17,1 \pm 0,34$ mg/g) referenciado por (Fujioka y Shibamoto 2008). Otros autores han mencionado que a medida que se incrementa la temperatura en el proceso de tueste se reduce el contenido de ACG's debido a la inestabilidad térmica que se genera a temperaturas superiores a 80°C (Wu et al., 2021) y a la ruptura de los enlaces carbono-carbono (Farah et al. 2005); sin embargo, el R-Cuadrada de los datos obtenidos en el estudio, generó un coeficiente de correlación entre ACG (mg/g) y Tiempo Tueste (min) igual a $-0,244108$, indicando una relación relativamente débil entre las variables. En cuanto a los compuestos de tipo alcaloide mayoritarios en el café (Inés et al., 2019), la cafeína demuestra ser relativamente termoestables (Wu et al., 2021) y la trigonelina a degradarse durante el proceso de formación de compuestos volátiles responsables del sabor y aroma del café. (Jeszka-Skowron et al., 2020)

Los valores obtenidos para cafeína son relacionados con el contenido reportado por (Rodriguez et al., 2020) equivalente a 17 mg/g en café de procesamiento húmedo y tueste medio. Mientras los valores de trigonelina son relacionados con los resultados obtenidos por (Jeszka-Skowron et al., 2020), que corresponden a un nivel de tueste similar al del estudio, pero con orígenes diferentes a Colombia.

4. Conclusiones

La variación de los parámetros de operación tales como flujo de aire y potencia del quemador permitieron mantener una tasa de incremento de temperatura decreciente durante el proceso de tueste, reflejándose en ahorros energéticos.

El rango de variación de los parámetros de operación evaluados no afectó la puntuación SCA, resultando en cafés de especialidad para todos los niveles. Algunos atributos sensoriales fueron resaltados debido a la prolongación de la etapa de Maillard y acortamiento de la fase de desarrollo.

El efecto que se puede inducir en las fases del tueste a partir de variaciones en los parámetros operativos durante el proceso permite diseñar un perfil sensorial deseado, el cual se podrá controlar a través de indicativos como lo son el área bajo la curva (AUC) y la tasa de aumento de temperatura del grano (ROR).

Un tueste de nivel claro puede representar menores consumos de energía, perfiles con taza limpia, conservación de compuestos bioactivos y menor pérdida de componentes volátiles dando lugar a un café de baja densidad y alto rendimiento.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Centro Surcolombiano de Investigación en Café CESURCAFÉ y de la Universidad Surcolombiana (USCO).

6. Referencias

- *Investigations on the Hot Air Roasting of COFFEE Beans SCHENKER TPhD Swiss ETH.* (2000).
- Aliah, A. M. N., Fareez Edzuan, A. M., & Diana, A. M. N. (2015). Noor Diana., A Review of Quality Coffee Roasting Degree Evaluation. *Journal of Applied Science and Agriculture*, 10(7), 18–23. www.aensiweb.com/JASA
- Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R., & Escher, F. (2008). Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5836–5846. <https://doi.org/10.1021/jf800327j>
- Bustos-Vanegas, J. D., Corrêa, P. C., Martins, M. A., Baptestini, F. M., Campos, R. C., de Oliveira, G. H. H., & Nunes, E. H. M. (2018). Developing predictive models for determining physical properties of coffee beans during the roasting process. *Industrial Crops and Products*, 112, 839–845. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.015>
- Cortés Macías, E. T., Fuentes López, A., Fuentes López, C., Manuel, J., & Baviera, B. (2018). *EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y SENSORIALES DE CAFÉ VARIEDAD COLOMBIA OBTENIDO POR DIFERENTES TRATAMIENTOS DE POSTCOSECHA.*
- Fabbri, A., Cevoli, C., Alessandrini, L., & Romani, S. (2011). Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process. *Journal of Food Engineering*, 105(2), 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.030>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, & Cenicafé. (2013). *Manual del Cafetero Colombiano* (Vol. 2).
- Hoos, Rob. (2015). *Modulating the flavor profile of coffee : one roaster's manifesto.* [Rob Hoos Coffee Consulting].

- Hu, G., Peng, X., Gao, Y., Huang, Y., Li, X., Su, H., & Qiu, M. (2020). Effect of roasting degree of coffee beans on sensory evaluation: Research from the perspective of major chemical ingredients. *Food Chemistry*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127329>
- Inés, G., Quintero, P., Fanny, L., & Giraldo, E. (2019). RELATIONSHIPS BETWEEN THE CONCENTRATION OF COFFEE CHEMICAL COMPOUNDS AND ROASTING TEMPERATURES RELACIONES ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE COMPUESTOS QUÍMICOS DEL CAFÉ Y LAS TEMPERATURAS DE TORREFACCIÓN. In *Cenicafé* (Vol. 70, Issue 2).
- Jeszka-Skowron, M., Frankowski, R., & Zgoła-Grześkowiak, A. (2020). Comparison of methylxantines, trigonelline, nicotinic acid and nicotinamide contents in brews of green and processed Arabica and Robusta coffee beans – Influence of steaming, decaffeination and roasting processes on coffee beans. *LWT*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109344>
- Jeszka-Skowron, M., Zgoła-Grześkowiak, A., & Grześkowiak, T. (2015). Analytical methods applied for the characterization and the determination of bioactive compounds in coffee. In *European Food Research and Technology* (Vol. 240, Issue 1, pp. 19–31). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2356-z>
- Osorio, V., Pabón, J., Gallego, C. P., & Echeverri, L. F. (2021). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la composición química del café. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72103. <https://doi.org/10.38141/10778/72103>
- Pantaleo, A. M., Fordham, J., Oyewunmi, O. A., & Markides, C. N. (2017). Intermittent waste heat recovery: Investment profitability of ORC cogeneration for batch, gas-fired coffee roasting. *Energy Procedia*, 129, 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.209>
- Pastoriza, S., & Rufián-Henares, J. A. (2014). Contribution of melanoidins to the antioxidant capacity of the Spanish diet. *Food Chemistry*, 164, 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.118>
- Rao, Scott. (2014). *The coffee roaster's companion*.
- Rodriguez, Y. F. B., Guzman, N. G., & Hernandez, J. G. (2020). Effect of the postharvest processing method on the biochemical composition and sensory analysis of arabica coffee. *Engenharia Agricola*, 40(2), 177–183. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P177-183/2020>
- Sacchetti, G., di Mattia, C., Pittia, P., & Mastrocola, D. (2009). Effect of roasting degree, equivalent thermal effect and coffee type on the radical scavenging activity of coffee brews and their phenolic fraction. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.005>
- Schwartzberg, H. (2013). Batch Coffee Roasting; Roasting Energy Use; Reducing That Use. In *Food Engineering Series* (pp. 173–195). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2_10
- Smrke, S., Kroslovakova, I., Gloess, A. N., & Yeretizian, C. (2015). Differentiation of degrees of ripeness of Catuai and Tipica green coffee by chromatographical and statistical techniques. *Food Chemistry*, 174, 637–642. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.060>
- Specialty Coffee Association. (2003). (n.d.). *Cupping Protocols. Protocols & Best Practices*. <https://Sca.Coffee/Research/Protocols-Best-Practices>.
- Strezov, V., & Evans, T. J. (2005). Thermal analysis of the reactions and kinetics of green coffee during roasting. *International Journal of Food Properties*, 8(1), 101–111. <https://doi.org/10.1081/JFP-200048060>
- Toci, A. T., Azevedo, D. A., & Farah, A. (2020). Effect of roasting speed on the volatile composition of coffees with different cup quality. *Food Research International*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109546>

- Wu, H., Gu, J., Bk, A., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). Effect of processing on bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds in coffee beans. *Food Bioscience*, 101373. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101373>