

COMPOSICIÓN QUÍMICA E INOCUIDAD DE *Coffea arabica* L. PROCESADO POR VÍA SECA EN COLOMBIA

Claudia Patricia Gallego Agudelo *, Luz Fanny Echeverri Giraldo *, Jenny Paola Pabón Usaquén *,
Valentina Osorio Pérez **

Gallego, C. P., Echeverri, L. F., Pabón, J., & Osorio, V. (2024). Composición química e inocuidad de *Coffea arabica* L. procesado por vía seca en Colombia. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75202. <https://doi.org/10.38141/10778/75202>



La creciente demanda del mercado mundial, evidencia una tendencia por cafés con perfiles sensoriales con atributos diferenciados. El café procesado por vía seca, denominado natural (CN), viene presentándose como una alternativa, de la cual es importante conocer sus características químicas y microbiológicas para garantizar la calidad final de la bebida. Para lograr lo anterior, fueron evaluados cinco tratamientos, en los cuales el CN se sometió a secado solar (S), secado mecánico (M) ($40\pm 5^\circ\text{C}$) y tres combinaciones: S45%+M, S50%+M, S55%+M, realizando secado solar hasta alcanzar diferentes contenidos de humedad en el café y finalizando con secado mecánico hasta el porcentaje de humedad final. Adicionalmente, se consideró un testigo con café lavado obtenido por vía húmeda (CL) secado mecánicamente. El CN y CL alcanzaron una humedad del 10% al 12% en los diferentes tratamientos, al finalizar el proceso de secado. En promedio para el CN, los contenidos químicos para las variables lípidos totales, ácidos grasos, ácidos orgánicos, ácidos clorogénicos totales, alcaloides y sacarosa no presentaron diferencias significativas con respecto al CL, mientras que las concentraciones de glucosa, fructosa y proteína fueron significativamente mayores en el CN que en el CL. La detección de microorganismos mostró que, mohos y levaduras para CN secado mecánicamente presentaron un valor promedio de $3,0 \times 10^5$ UFC/g en el grano almendra y para café lavado secado mecánicamente un valor de $1,1 \times 10^4$ UFC/g. La concentración de Ocratoxina A, no presentó efecto por tipos de secado y los valores fueron en promedio 7,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para CN y 6,4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para el CL.

Palabras clave: Beneficio del café, café natural, café lavado, secado solar, secado mecánico, composición química, inocuidad, Ocratoxina A, Colombia.

CHEMICAL COMPOSITION AND SAFETY OF DRY PROCESSED *Coffea arabica* L IN COLOMBIA

The growing demand of the world market shows a trend for coffees with sensory profiles with differentiated attributes. Dry-processed coffee, called natural (CN), has been presented as an alternative, of which it is important to know its chemical and microbiological characteristics to guarantee the final quality of the drink. To achieve the above, five treatments were evaluated, in which the CN was subjected to solar drying (S), mechanical drying (M) ($40\pm 5^\circ\text{C}$) and three combinations: S45%+M, S50%+ M, S55%+M, performing solar drying until different moisture contents are reached in the coffee and ending with mechanical drying until the final moisture percentage is reached. In addition, a control was demonstrated with coffee washing obtained by wet method (CL) mechanical drying. The CN and CL reached a humidity of 10% to 12% in the different treatments, at the end of the drying process. On average for the CN, the chemical contents for the variables total lipids, fatty acids, organic acids, total chlorogenic acids, alkaloids and sucrose did not present significant differences with respect to the CL; The data were within the ranges reported by other authors for *C. arabica* L. The concentrations of glucose, fructose and protein were significantly higher in the CN than in the CL. The detection of microorganisms showed that molds and yeasts for mechanically dried CN presented an average value of 3.0×10^5 CFU/g in the almond bean and for mechanically dried washed coffee a value of 1.1×10^4 CFU/g. The concentration of Ochratoxin A did not present an effect due to drying types and the values were on average 7.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ for CN and 6.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ for CL.

Keywords: Coffee processing, natural coffee, washed coffee, sun drying, mechanical drying, chemical composition, innocuous, Ochratoxin A, Colombia.

*Asistente de Investigación. Disciplina de Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-1532-8055>, <https://orcid.org/0000-0002-9866-6147>, <https://orcid.org/0000-0003-1576-2297>, respectivamente.

** Investigador Científico I. Disciplina de Calidad, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-1166-0165>

El café natural (CN) es un producto que se obtiene a partir del procesamiento del fruto de café por vía seca, que se ha destacado como una alternativa de bajo consumo de agua en el proceso de poscosecha, y se usa a menudo en países donde las precipitaciones son escasas y hay largos períodos de sol para secar adecuadamente los frutos de café (Silva et al., 2008; Vincent, 1987). Etiopía y Yemen fueron pioneros en su comercialización y en la actualidad Brasil, Etiopía, Haití, Indonesia, Paraguay, Nueva Guinea e India, son los países con mayor oferta de este tipo de café en el mercado (Silva et al., 2008).

Mediante el procesamiento vía seca no se retiran las partes constitutivas del fruto, este se seca en su totalidad hasta alcanzar una humedad entre el 10,0% y el 12,5%, generando características específicas y diferenciales en la bebida (Osorio et al., 2022; Puerta, 1996). Este proceso es amigable con el medio ambiente, debido a que disminuye notablemente la huella hídrica (Borém et al., 2018; Isquierdo et al., 2013), pero hay un mayor consumo de energía (secado mecánico) y se requiere mayor área de secado (secado solar), así como mayor cantidad de mano de obra (Osorio et al., 2022). Adicionalmente, en la etapa de trilla debe contarse con una máquina específica para el café cereza seco (ccs).

Para obtener café natural es recomendable iniciar con una masa de café constituida por frutos maduros, cosechados manualmente (Martínez et al., 2022; Osorio et al., 2022; Smrke et al., 2014), seguido por el proceso de secado, que se considera la etapa más crítica, ya que implica un período de tiempo mayor respecto al requerido durante el proceso del café lavado (Malta et al., 2013). Por consiguiente, el secado lento y controlado, que puede fluctuar entre 12 a 21 días al sol y/o complementado mecánicamente, en el que la almendra consolida mayor concentración de azúcares, permite el

desarrollo de las características que identifican al café natural (Knopp et al., 2006). Entre los cambios más destacables en el grano están el cambio del color del grano a pardo–amarillento y diferentes descriptores del atributo fragancia/aroma como chocolate, frutal, caramelo, miel, pulpa dulce y vinoso sabor dulce; lo anterior como respuesta diferencial del tipo de secado (Gallego et al., 2023; Osorio et al., 2022).

Pese a que el mercado ofrece una importante expectativa para el consumo de café natural, es evidente que en muchos casos los procedimientos para su obtención suelen generar atributos variables y no consistentes, los cuales se derivan principalmente de la aparición de hongos y microorganismos que alteran la calidad final (Borém et al., 2008; Elhalis et al., 2023). Es así que, en un escenario con bajo control en el procedimiento, particularmente por efecto de la humedad en el grano y la temperatura ambiental, la inocuidad del producto puede deteriorarse debido a la aparición de hongos filamentosos como *Aspergillus ochraceus*, *Penicillium verrucosum* y *Penicillium viridicatum*, productores de micotoxinas, como la ocratoxina A (OTA) (Batista et al., 2009; Vanesa & Ana, 2013); este compuesto micotóxico que aparte de representar un riesgo permanente para la comercialización del café, pone en riesgo la salud de quien consume la bebida (Milla Flores et al., 2020).

Como resultado de la interacción de la humedad en el grano y de los procesos no controlados durante el secado del café natural se originan compuestos químicos derivados de la actividad microbiológica (de Melo Pereira et al., 2019); la concentración de estos compuestos está influenciada por los diferentes métodos de procesamiento, el origen genético y las condiciones de producción local. Debido a que, durante el secado del café natural estos compuestos químicos pueden alterar la inocuidad y la calidad sensorial de café,

generando resultados poco consistentes, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la composición química, microbiológica y el contenido de OTA de diferentes métodos de secado del café natural, obtenido en la zona cafetera central colombiana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (5° 00' latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste y 1.310 m de altitud, con temperatura media de 21,2°C, temperatura máxima de 27,9°C, temperatura mínima de 17°C y humedad relativa del 82,3%, ubicado en Manizales, Caldas. Se emplearon frutos de café 100% maduros, de variedad Cenicafé 1, provenientes de la Estación Experimental Naranjal, durante las cosechas de los años 2020 y 2021. Los frutos se clasificaron hidráulicamente, para eliminar aquellos de inferior calidad, luego se llevó a cabo una clasificación manual consistente en retirar los frutos verdes y pintones. De la unidad experimental de 200 kg, fueron distribuidos aleatoriamente a cada tratamiento 18 kg de café, que conformaron los diferentes procesos de secado: solar (S), mecánico (M) y combinaciones de secado S+M hasta alcanzar el porcentaje de humedad correspondiente para los tratamientos 2 al 4 (Tabla 1). Se incluyó como

testigo, el tratamiento 1 compuesto por café lavado (CL) secado mecánicamente (control). Cada tratamiento contó con nueve unidades experimentales (Gallego et al., 2023).

El proceso de secado solar se realizó en un secador parabólico, garantizando 2,0 cm de altura de capa de café, con una frecuencia de volteo de cuatro veces al día. Para los tratamientos de secado mecánico se utilizó un silo de capa estática con combustión directa (gas propano) y un caudal de aire de 100 m³ min⁻¹, garantizando una capa fija de altura de 35 cm y temperatura constante del aire de secado correspondiente a 40±5°C. Finalmente, el café lavado (CL) se obtuvo despulpando la masa cosechada en un tiempo inferior a 6 horas, permitiendo la fermentación espontánea, con estimación del tiempo de lavado asociado al uso del Fermaestro™ (Peñuela et al., 2013), y secado mecánicamente, hasta alcanzar un porcentaje de humedad, entre el 10% y el 12%.

Una vez la humedad del café alcanzó un nivel entre el 10% al 12%, los granos se trillaron hasta obtener el café almendra, retirando los defectos físicos e impurezas. La almendra sana fue dividida para realizar las diferentes determinaciones bioquímicas y microbiológicas.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Procesos de secado	Nomenclatura
1	CN secado solar 100%	S100%
2	CN secado solar hasta 45% de humedad + secado mecánico	S45%+M
3	CN secado solar hasta 50% de humedad + secado mecánico	S50%+M
4	CN secado solar hasta 55% de humedad + secado mecánico	S55%+M
5	CN secado mecánico 100%	M100%
6	Café lavado con secado mecánico (Control)	CL

Determinación de lípidos y ácidos grasos.

La determinación de lípidos totales se realizó en un equipo Soxhlet según el método de la AOAC 945.1 (Kinton, 2005) mediante una extracción sólido-líquido, a partir de la almendra de café molida criogénicamente y extraída con éter de petróleo. Posteriormente, en la fracción lipídica se realizó la determinación de ácidos grasos libres, empleando un equipo de cromatografía de gases (HP-8860) acoplada a un detector selectivo de masas (HP-6890), según el método de referencia AOAC 969.33 (Firestone, 2005). La cuantificación de cada compuesto se realizó por normalización y su identificación por comparación de los espectros obtenidos con la base de datos de la librería NIST 2017.

Determinación de ácidos clorogénicos y orgánicos.

La extracción de ácidos clorogénicos totales se realizó siguiendo el método DIN 10767 a partir de muestras desengrasadas de café almendra con metanol al 70% y posterior purificación del extracto con reactivos de Carrez I y II. La cuantificación se llevó a cabo en un equipo de espectrofotometría UV/VIS (Beckham DU-650) utilizando tres longitudes de onda de 265, 328 y 380 nm, empleando como referencia en la curva de calibración un estándar de ácido clorogénico 5-CQA (Marín & Puerta, 2008)

Los ácidos orgánicos fueron extraídos con agua a 90°C por 5 min, separados y cuantificados en un cromatógrafo líquido de alta eficiencia acoplado a un detector de arreglo de diodos (Alliance 2690-996 PDA), utilizando una columna Supelcogel C-610H de 300 mm x 7,8 mm, a un flujo de 0,5 mL min⁻¹, con una fase móvil isocrática al 0,1% de H₃PO₄ y una temperatura de 35°C. Los diferentes ácidos fueron detectados a 210 nm y cuantificados a partir de la construcción de curvas de calibración realizadas con

estándares de referencia de cada ácido orgánico (Echeverri-Giraldo et al., 2024).

Determinación de los alcaloides (cafeína, trigonelina y teobromina) y proteína.

La determinación de los alcaloides (cafeína, trigonelina y teobromina), se realizó según la Norma ISO 20481:2008 por cromatografía líquida de alta eficiencia con un detector de arreglo de diodos (Alliance 2690-996 PDA), utilizando para la separación una columna Symmetry C18 (Waters, 4,6 × 250 mm, 100 Å, 5 μm) y una solución de agua, metanol, ácido acético (59:40:1 v/v/v) como fase móvil. Los alcaloides fueron detectados a 273 nm y la cuantificación fue realizada con curvas de calibración empleando estándares de referencia.

El contenido de proteína cruda se determinó por el método combustión seca (Dumas) AOAC 990.03 (Wendt, 2005) en un analizador elemental marca LECO a partir de la cuantificación de nitrógeno presente en la muestra aplicando el factor 6,25.

Determinación de azúcares.

Los azúcares se determinaron según el método de referencia ISO 10504:2013, empleando un cromatógrafo líquido de alta eficiencia (Alliance e2690) acoplado a un detector de índice de refracción (Waters 2475). En la separación se empleó una columna Sugar-pak I (5 μm; 4,6 X 350 mm) con una fase móvil 100 mM EDTA-Ca, a un flujo de 0,5 mL min⁻¹ y una temperatura de 85°C. La cuantificación de cada analito se realizó a partir de curvas de calibración, empleando estándares de referencia.

Determinación de OTA y microbiota.

Para la detección de OTA se empleó el método de fluorescencia de Vicam Ochrates[®], empleando columnas de inmunoafinidad (OchraTestTM), realizando una extracción del café almendra molido con bicarbonato de sodio en metanol

al 1%. Posteriormente, a través de la columna de inmunoafinidad que contiene anticuerpos específicos para la OTA, el extracto obtenido fue cuantificado en un fluorómetro serie 4 EX en un rango de cuantificación entre 1-50 ppb ($\mu\text{g kg}^{-1}$).

Para la determinación de la microbiota se efectuaron conteos de tres grupos de microorganismos, en los frutos secos y en el café almendra para cada uno de los tratamientos evaluados después de los procesos de secado; se cuantificaron las unidades formadoras de colonia (UFC) tanto en el fruto seco, café pergamino seco y su correspondiente almendra. Se realizó la siembra en un sistema de medio de cultivo 3M™ Petrifilm™, siguiendo la metodología para bacterias mesófilas aerobias (AOAC 990.12), y para mohos y levaduras (AOAC 997.02) (Andrews & Hammack, 2005). Para el recuento de las bacterias mesófilas el tiempo de incubación fue de 24 horas a $35\pm 1^\circ\text{C}$, mientras que, para el crecimiento de mohos y levaduras, el tiempo de incubación fue de dos a tres días a una temperatura de $25\pm 1^\circ\text{C}$.

Análisis de información

Se realizó un análisis de varianza con nivel de significancia del 5,0% en todas las variables, cuando se identificó efecto de tratamientos se aplicó una prueba múltiple Tukey al 5%, con el fin de establecer las diferencias entre los respectivos tratamientos y la prueba de comparación Dunnett al 5%, para las comparaciones con respecto al tratamiento testigo CL. Específicamente para las variables de tipo microbiológico, se evaluaron los promedios e intervalos de confianza al 95%, con el fin de establecer los cambios en sus poblaciones, entre la matriz fruto vs café almendra, a nivel de cada tratamiento para el CN y en café pergamino vs café almendra para el CL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lípidos totales y ácidos grasos. Para todos los tratamientos de secado de CN y CL se calcularon los contenidos de lípidos, expresados en base húmeda (b.h). Los lípidos, que constituyen en el grano del café, contribuyen al transporte de los aromas y sabores (Figueiredo et al., 2015), así como al cuerpo de la bebida y al transporte de vitaminas liposolubles (Oestreich-Janzen, 2010). Los promedios de lípidos totales en todos los tratamientos de secado estuvieron entre 10,2% a 10,5% (Tabla 2), siendo inferiores a los registrados por Rendón et al. (2014), quienes hallaron valores cercanos al 12% en la variedad IPR98 (Híbrido de Timor \times Villa Sarchí), procesada como café natural y café semi-húmedo. Sin embargo, concuerdan con los valores entre 10,7% y 12,3% (b.s) reportados por Echeverri-Giraldo et al. (2020) en variedades mejoradas de *Coffea arabica* L., cultivadas en Colombia procesadas por vía húmeda.

En estudios anteriores, Villareal-Peña et al. (2012) establecieron que los ácidos grasos con contenidos superiores al 0,5% se consideraban como ácidos grasos mayoritarios y los ácidos grasos con contenidos inferiores como minoritarios. Por consiguiente, los ácidos grasos libres mayoritarios identificados fueron: palmítico, linoleico, esteárico, oleico y araquídico. Los ácidos grasos libres presentes en la fracción lipídica del café natural y del café lavado no presentaron diferencias en su concentración para los dos tipos de procesamiento de café evaluados, en los seis tratamientos de secado probados (Tabla 2). Estos valores estuvieron de acuerdo con los reportados para *C. arabica* en variedades sembradas en Colombia (Osorio et al., 2022) sin detectarse cambios significativos por efecto de tratamientos.

Tabla 2. Promedios de los compuestos químicos (%) del café almendra en seis procesos de secado.

Compuesto (%)	S100%		S45%+M		S50%+M		S55%+M		M100%		CL (Control)							
	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv						
Lípidos totales	10,45	a	1,17	10,47	a	0,83	10,32	a	1,47	10,23	a	0,76	10,46	a	1,23	9,85	a	0,80
Palmitico	41,49	a	2,29	41,16	a	1,89	41,44	a	1,90	40,89	a	1,85	40,83	a	2,05	41,06	a	1,82
Linoleico	34,63	a	1,56	34,9	a	1,59	35,07	a	1,97	34,91	a	1,38	34,89	a	1,62	34,87	a	1,17
Oleico	10,14	a	0,68	10,19	a	0,70	10,02	a	0,61	10,18	a	0,84	10,46	a	0,75	10,26	a	0,59
Esteárico	9,43	a	1,05	9,37	a	0,94	9,22	a	0,76	9,6	a	0,95	9,3	a	0,87	9,43	a	0,83
Araquídico	4,29	a	0,93	4,37	a	0,89	4,24	a	0,93	4,44	a	0,86	4,51	a	1,19	4,37	a	0,91

* Letras no comunes en las filas indican diferencias estadísticas entre los tratamientos según prueba Tukey al 5%.

Ácidos clorogénicos y ácidos orgánicos.

Respecto al contenido total de ácidos clorogénicos (CQA), estos pueden variar según la especie de café (Higdon & Frei, 2006), el grado de maduración de los frutos, las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo y las prácticas de manejo del producto agrícola tanto en el campo como en la fase de poscosecha (Bauer et al., 2018). En este estudio no hubo diferencias estadísticas entre los cinco procesos de secado de CN y el CL, registrándose promedios de ácidos clorogénicos totales entre 3,72%–4,70% para el CN y 3,79% para el café lavado. Estos niveles estuvieron por debajo de los reportados en Brasil por Scholz et al. (2019), donde obtuvieron contenidos de CQA entre 7,9% a 8,1%; confirmando que las condiciones ambientales tienen mayor influencia sobre el contenido de estos ácidos, aún por encima del proceso mismo de secado.

En el contenido de ácidos orgánicos no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de procesamiento de CN y el testigo CL (Tabla 3). De forma similar, Osorio et al. (2023) reportaron contenidos similares en los ácidos cítrico, quínico, málico y acético en CN. Por su parte, para cafés lavados, Santiago et al. (2020) y Echeverri-Giraldo et al. (2024) reportaron contenidos de ácido cítrico entre 7,5–13 g kg⁻¹, oxálico entre 0,4–0,8 g kg⁻¹, málico entre 2,6–4,4 g kg⁻¹, quínico entre 1,9–3,4 g kg⁻¹, succínico entre 1,5–3,7 g kg⁻¹, láctico entre 0,5–1,2 g kg⁻¹ y acético entre 9,3–14 g kg⁻¹; de estos ocho ácidos, el acético y láctico pueden generarse por actividad de la microbiota presente en el grano de café lavado (Clarke & Vitzthum, 2001; Silva et al., 2008; Koshiro et al., 2015; Osorio Pérez et al., 2023) y estos a su vez, se relacionan con el dulzor y la acidez de la bebida de café.

En general, no se detectaron variaciones significativas por efecto de los tratamientos evaluados en los promedios de lípidos totales, ácidos grasos libres y en la concentración de ácidos orgánicos en las muestras de café almendra, con valores similares a los reportados para la especie *C. arabica* (Echeverri-Giraldo et al., 2020; Nikolova-Damyanova et al., 1998).

Azúcares. Los contenidos de azúcares reductores presentaron diferencias estadísticamente significativas en los tratamientos de secado de CN con respecto al CL, para la glucosa y la fructuosa (Figura 1). El promedio de glucosa fue de 0,14% en todos los tratamientos de secado del CN, triplicando significativamente los contenidos hallados en el tratamiento testigo (CL) con 0,06% (Figura 1a). Este comportamiento se reflejó también para los contenidos de fructosa, cuyos promedios fueron 0,16% superiores en todas las modalidades de secado de CN, con respecto al encontrado en el testigo (CL) 0,08% (Figura 1b). Con relación a la sacarosa, su contenido estuvo entre 8,66%–8,84% sin presentar efecto de tratamientos (Figura 1c). En contraste, el contenido de fructosa y glucosa (azúcares reductores) suele ser mayor en el procesamiento de café vía seca que en el café lavado (Knopp et al., 2006), siendo importante resaltar que dichas estructuras cumplen la función como precursores del aroma (Scholz et al., 2019). Estudios recientes realizados en la zona cafetera colombiana por Osorio et al. (2022), reportan contenidos de sacarosa de 9,6% para CN a partir de combinaciones de secado solar y mecánico.

Cafeína, trigonelina, teobromina y proteína total.

Los alcaloides (cafeína, trigonelina y teobromina) no mostraron diferencias estadísticas en los tratamientos evaluados (Tabla 4). El contenido de cafeína, en promedio estuvo en 1,09% para café lavado

Tabla 3. Promedios, rangos y variación de los ácidos orgánicos (g kg⁻¹) en el café natural y lavado, en los tratamientos evaluados.

Ácido (g kg⁻¹)		S100%	S45%+M	S50%+M	S55%+M	M100%	CL(Control)
	Promedio	9,69	10,23	9,92	10,06	9,51	9,43
Cítrico	Mín-Máx	8,2-11,2	9,3-11,6	8,8-11,0	9,2-10,9	8,3-10,7	8,5-10,3
	Desv. Est.	1,95	1,20	1,40	1,08	1,59	1,19
	Promedio	4,76	5,11	4,77	4,51	4,29	3,62
Málico	Mín-Máx	3,9-5,5	4,5-5,7	3,7-5,8	3,6-5,4	3,3-5,3	2,7-4,5
	Desv. Est.	1,03	0,84	1,35	1,18	1,26	1,15
	Promedio	0,04	0,03	0,03	0,06	0,04	0,14
Oxálico	Mín-Máx	0,02-0,07	0,0-0,07	0,0-0,06	0,01-0,11	0,0-0,09	0,01-0,25
	Desv. Est.	0,04	0,04	0,04	0,07	0,06	0,16
	Promedio	1,72	1,78	1,72	1,73	1,67	1,45
Succínico	Mín-Máx	1,1-2,3	1,5-2,1	1,4-2,1	1,4-2,0	1,3-2,1	0,8-2,0
	Desv. Est.	0,78	0,43	0,48	0,41	0,54	0,78
	Promedio	7,39	8,64	7,99	8,06	8,35	7,64
Quínico	Mín-Máx	5,6-9,2	7,5-9,8	6,6-9,4	6,4-9,7	6,4-10,3	6,0-9,3
	Desv. Est.	2,38	1,52	1,80	2,10	2,59	2,10
	Promedio	0,36	0,31	0,34	0,35	0,35	0,30
Láctico	Mín-Máx	0,29-0,4	0,27-0,34	0,27-0,4	0,3-0,4	0,29-0,41	0,25-0,35
	Desv. Est.	0,09	0,05	0,08	0,06	0,08	0,06
	Promedio	3,90	3,78	4,38	4,01	2,68	2,68
Acético	Mín-Máx	2,4-5,4	2,2-5,3	2,5-6,3	2,7-5,3	1,9-3,4	1,2-4,1
	Desv. Est.	1,90	2,01	2,49	1,74	0,96	1,87
	Promedio	0,71	0,69	0,71	0,71	0,53	0,51
Tartárico	Mín-Máx	0,5-0,9	0,5-0,8	0,4-0,9	0,4-1,03	0,3-0,7	0,2-0,8
	Desv. Est.	0,28	0,22	0,36	0,41	0,29	0,44

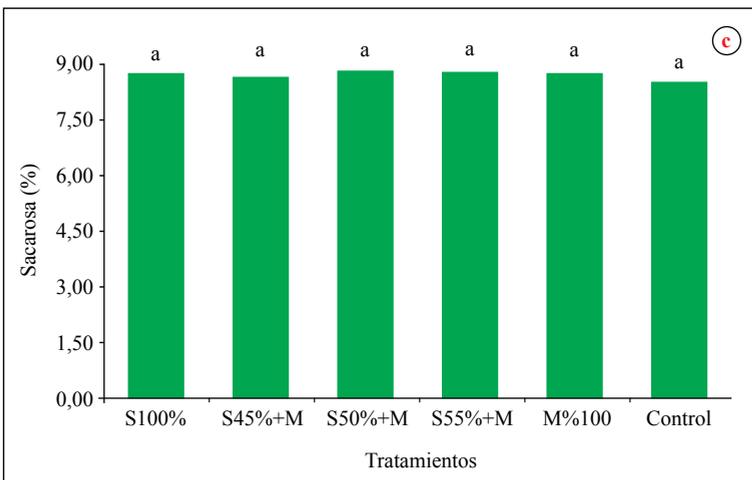
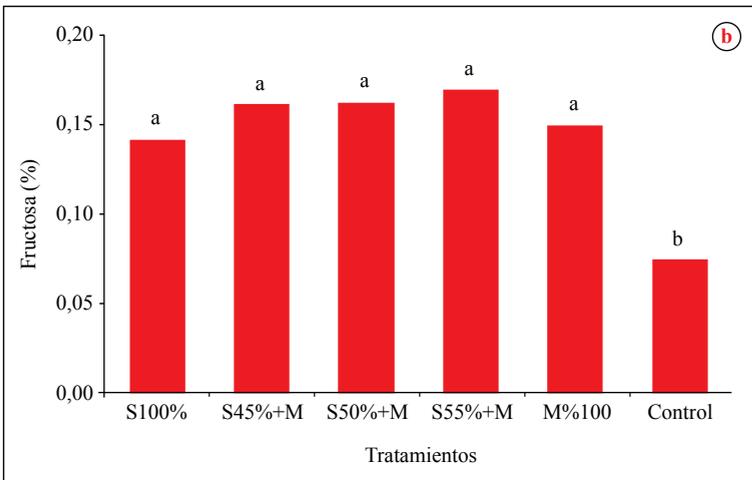
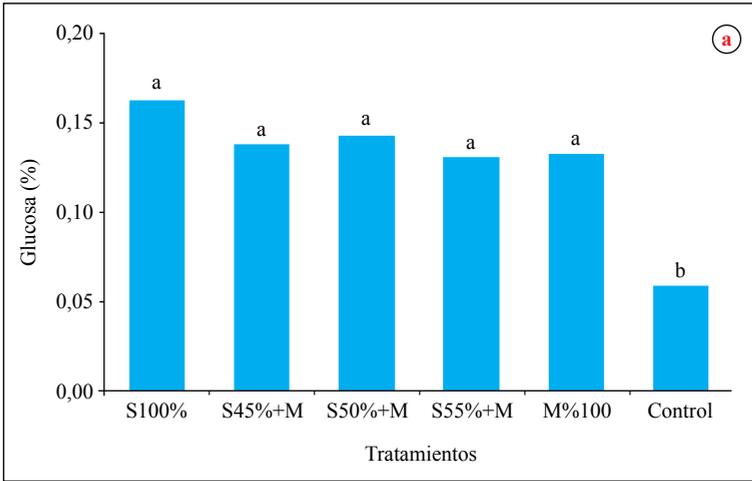


Figura 1. Concentración promedio de azúcares por efecto de los tratamientos. a. Glucosa, b. Fructosa, c. Sacarosa. Letras no comunes indican diferencias estadísticas según prueba Tukey al 5%.

y 1,12% para el café natural (Tabla 4). Con respecto a la trigonelina, los valores promedios fueron de 1,02% y 0,95% para el CN y CL, respectivamente (Tabla 4). Estos contenidos fueron similares a los reportados por Scholz et al. (2019) para CN, entre 1,22% a 1,23% para cafeína y entre 1,06% a 1,19% para trigonelina. Para la teobromina todos los tratamientos y el testigo presentaron el mismo promedio.

Los contenidos de proteína total fluctuaron entre 12,91% a 14,55% (Tabla 4); comportamiento similar se presenta en los estudios realizados por Barbosa et al. (2019), quienes reportan contenidos de proteína entre 13,55% – 15,23%. Al respecto, Franca et al. (2005) establecieron que un mayor contenido de proteínas en los granos de café estaba asociado con mayor calidad sensorial.

Ocratoxina A – (OTA). El promedio de OTA fue de $7,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ (ppb) (Tabla 4). Las muestras de café natural secadas 100% al sol y 100% mecánicamente, presentaron concentraciones similares de OTA. En los tres procesos de secado combinando secado solar y mecánico, se presentaron concentraciones de OTA entre $6,16$ a $8,16 \mu\text{g kg}^{-1}$. En el café lavado el contenido de OTA fue $6,4 \mu\text{g kg}^{-1}$, evidenciando que las muestras de café verde, provenientes tanto del CN como del CL se encuentran dentro de los rangos reportados para estos tipos de cafés. Estudios realizados por Paterson & Taniwaki (2014) mostraron valores en el rango de $4,90$ a $37,73 \mu\text{g kg}^{-1}$ para café almendra y estudios realizados por Vanesa & Ana (2013) reportan para el café colombiano niveles promedios de OTA de $10,0$ y $6,8 \mu\text{g kg}^{-1}$ para café almendra y soluble, respectivamente.

Los límites permitidos de OTA en el café almendra no han sido regulados, pero pueden acercarse a niveles tan bajos como $2,0$ a $4,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Puerta, 2003; Pabón et al., 2023). Cabe

resaltar que los límites permitidos según la regulación internacional de la Unión Europea (UE) publicado en 2022 (N° 1370/2022) para granos de café tostado y café tostado molido es de $3,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ y para el café soluble (café instantáneo) de $5,0 \mu\text{g kg}^{-1}$; Sin embargo, la UE aún no ha establecido los límites máximos para el café almendra.

Microbiota. La variación de la temperatura y del tiempo de secado es un factor crítico para crecimiento de diversos microorganismos (Silva et al., 2008). En el presente estudio las poblaciones de bacterias mesófilas aerobias presentaron valores de $2,47 \times 10^7$ UFC/g, iguales estadísticamente, tanto para los frutos de café como para el café almendra (Figura 2).

El secado solar presentó $1,0 \times 10^7$ UFC/g, siendo los menores promedios, así como la más baja variabilidad de bacterias aerobias, seguidas por el tratamiento S50%+M y S55%+M, cuyas poblaciones fueron de $1,28 \times 10^7$ y $1,92 \times 10^7$ UFC/g, respectivamente. Estudios de Nakayama et al. (2020) reportan que de las tres poblaciones de microorganismos (bacterias aerobias, mohos y levaduras), en el café natural las bacterias aerobias totales disminuyen con el tiempo de secado y la reducción de la actividad de agua; y los cafés secados al sol por más de 18 días favorecen el crecimiento de bacterias.

Finalmente, las evaluaciones del número de UFC de mohos y levaduras presentaron promedios superiores a $4,4 \times 10^5$ UFC/g en las poblaciones del fruto seco de todos los tratamientos, con respecto a los valores obtenidos en el café almendra. Este comportamiento fue diferente en el secado mecánico, donde las poblaciones de estos grupos de microorganismos predominaron en el café almendra con valores de $3,0 \times 10^5$ UFC/g (Figura 3). Puede observarse una mayor variabilidad en los contenidos promedios de microbiota,

Tabla 4. Promedio y desviación estándar (desv) de cafeína, teobromina, trigonelina, CQA, proteína y OTA en las muestras de café almendra.

Compuesto	S100%		S45%+M		S50%+M		S55%+M		M100%		CL(Control)							
	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv						
Cafeína (%)	1,11	a	0,09	1,12	a	0,135	1,11	a	0,142	1,14	a	0,125	1,12	a	0,108	1,09	a	0,097
Teobromina (%)	0,02	a	0,008	0,02	a	0,006	0,02	a	0,007	0,02	a	0,004	0,02	a	0,007	0,02	a	0,007
Trigonelina (%)	1,02	a	0,143	1,02	a	0,124	1,02	a	0,129	1,02	a	0,116	1,01	a	0,125	0,95	a	0,123
CQA (%)	3,85	a	0,756	3,81	a	0,756	4,05	a	0,789	3,72	a	0,873	3,89	a	0,852	3,79	a	1,069
Proteína (%)	13,73	a	0,652	13,85	a	0,53	13,70	a	0,611	13,83	a	0,456	13,64	a	0,511	12,33	b	4,664
OTA (µg/kg)	6,99	a	4,42	8,16	a	5,57	7,08	a	5,04	6,16	a	4,81	7,07	a	3,72	6,4	a	6,44

particularmente en la cereza seca, indicando que no es posible generar una relación entre los microorganismos presentes y el proceso de obtención de CN bajo las condiciones de secado evaluadas en este estudio.

Hamdouche et al. (2016) encontraron que la ecología microbiana varió en función del tipo de procesamiento (húmedo o seco), del origen geográfico y de las especies de café utilizadas. Además, las diferentes etapas del proceso pueden influir en la estructura de las comunidades microbianas encontradas en las muestras de café. Así mismo, Nakayama et

al. (2020) establecieron que la prevalencia de una especie y su sucesión microbiana en el grano de café depende de las condiciones fisicoquímicas del medio ambiente y de la composición química del fruto. En este estudio no se observaron diferencias en la microbiota, debido posiblemente al uso de una misma variedad en todos los tratamientos, así como de un origen único del cultivo. Adicionalmente, a las diferentes clasificaciones previas al proceso de secado que eliminaron frutos de inferior calidad y que de esta manera redujeron la variabilidad de poblaciones de microorganismos.

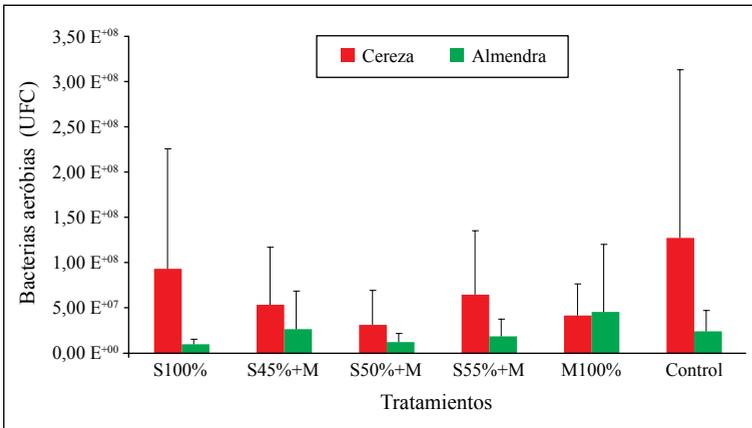


Figura 2. Valores de las poblaciones de bacterias aeróbicas en el fruto de café seco y en el café almendra de los tratamientos evaluados (UFC). En el tratamiento control la comparación de la concentración promedio de comunidades microbianas se hizo respecto al café en pergamino. Barras en los promedios indican intervalos de confianza al 5% de significancia.

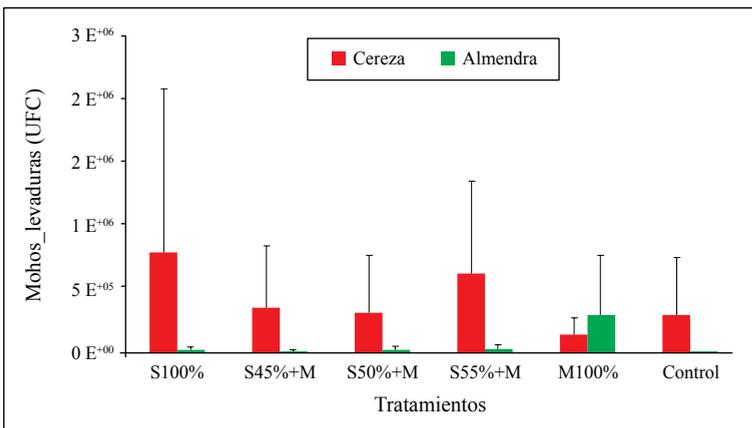


Figura 3. Valores de las poblaciones de mohos-levaduras en el fruto de café seco y en el café almendra para los tratamientos evaluados (UFC). En el tratamiento control la comparación de la concentración promedio de comunidades microbianas se hizo respecto al café en pergamino. Barras en los promedios indican intervalos de confianza al 5% de significancia.

Este estudio permitió establecer que es posible obtener café natural (CN) con características de calidad química e inocuidad reproducible, sin que la dinámica microbiana afecte negativamente el producto final. Los principales cambios están relacionados con el contenido de azúcares reductores y proteínas, los cuales están influenciados por los procesos de poscosecha más que por el origen. La concentración de lípidos totales y el promedio de los ácidos orgánicos estuvo dentro de los rangos registrados por otros estudios para *C. arabica* en variedades sembradas en Colombia, en todos los tratamientos, así como los promedios de sacarosa que se encontraron entre 8,53% y 8,85%, tanto para el café natural como para el café lavado. La concentración de OTA no presentó variaciones por tipo de procesamientos; cuyos niveles fueron en promedio 7,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para café natural y 6,4 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para el café lavado. Microbiológicamente, hubo una gran variación en los promedios en UFC de bacterias aerobias y mohos-levaduras en el fruto seco y en el café almendra, sin afectar la calidad y la inocuidad del café natural. Los resultados permiten establecer que, bajo condiciones adecuadas y procesos

de clasificación que aseguraron la calidad y el estado de madurez del fruto, además de los controles en el secado, es posible obtener café natural con características de calidad y de inocuidad, las cuales son similares o mejores que las obtenidas en el proceso del café lavado.

AGRADECIMIENTOS

En la Disciplina de Biometría a Luis Carlos Imbachí y en la Disciplina de Experimentación a Carlos Gonzalo Mejía, José Farid López y Jhon Félix Trejos. En la Disciplina de Calidad a Claudia Gómez, Paola Calderón, Wilson Vargas y Víctor Castañeda. La investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), código CAL102003.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Curación de datos, Redacción–borrador original: **CPG** y **VO**; Análisis formal, Metodología, Validación: **CPG**, **LFE** y **VO**; Redacción- revisión y edición: **CPG**, **LFE**, **VO** y **JP**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Andrews, W., & Hammack, T. (2005). Microbiological Methods. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.^a ed., pp. 1-252). AOAC International.
- Barbosa, M. de S. G., Scholz, M. B. dos S., Kitzberger, C. S. G., & Benassi, M. de T. (2019). Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews. *Food Chemistry*, 292, 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.072>
- Batista, L. R., Chalfoun, S. M., Silva, C. F., Cirillo, M., Varga, E. A., & Schwan, R. F. (2009). Ochratoxin A in coffee beans (*Coffea arabica* L.) processed by dry and wet methods. *Food Control*, 20(9), 784-790. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.10.003>
- Bauer, D., Abreu, J., Jordão, N., Rosa, J. S. D., Freitas-Silva, O., & Teodoro, A. (2018). Effect of Roasting Levels and Drying Process of *Coffea canephora* on the Quality of Bioactive Compounds and Cytotoxicity. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(11), 3407. <https://doi.org/10.3390/ijms19113407>
- Borém, F. M., Coradi, P. C., Saath, R., & Oliveira, J. A. (2008). Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(5), 1609–1615. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500038>
- Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. da S. (2018). Quality of Natural Coffee Dried Under Different Temperatures and Drying Rates. *Coffee Science*, 13(2), 159–167.

- Clarke, R. J., & Vitzthum, O. G. (Eds.). (2001). *Coffee: Recent Developments* (1a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470690499>
- Echeverri-Giraldo, L. F., Ortiz, A., Gallego, C. P., & Imbachí, L. C. (2020). Caracterización de la fracción lipídica del café verde en variedades mejoradas de *Coffea arabica* L. *Revista Cenicafé*, 71(2), 39–52. <https://doi.org/10.38141/10778/71203>
- Echeverri-Giraldo, L. F., Osorio Pérez, V., Tabares Arboleda, C., Vargas Gutiérrez, L. J., & Imbachí Quinchua, L. C. (2024). Content of Acidic Compounds in the Bean of *Coffea arabica* L., Produced in the Department of Cesar (Colombia), and Its Relationship with the Sensorial Attribute of Acidity. *Separations*, 11(2), 52. <https://doi.org/10.3390/separations11020052>
- Elhalis, H., Cox, J., & Zhao, J. (2023). Coffee fermentation: Expedition from traditional to controlled process and perspectives for industrialization. *Applied Food Research*, 3(1), 100253. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100253>
- Figueiredo, L., Meira Borem, F., Carmanini Ribeiro, F., Silva Giomo, G., Henrique Da Silva Taveira, J., & Ribeiro Malta, M. (2015). Fatty acid profiles and parameters of quality of specialty coffees produced in different Brazilian regions. *African Journal of Agricultural Research*, 10(35), 3484–3493. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9697>
- Firestone, D. (2005). Oils and Fats. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.ª ed., pp. 1-72). AOAC International.
- Franca, A. S., Mendonça, J. C. F., & Oliveira, S. D. (2005). Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. *LWT—Food Science and Technology*, 38(7), 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.014>
- Gallego, C. P., Imbachí, L. C., & Osorio, V. (2023). Influencia del proceso de secado del café natural en las características físicas del grano y la calidad sensorial. *Revista Cenicafé*, 74(1), e74107. <https://doi.org/10.38141/10778/74107>
- Hamdouche, Y., Meile, J. C., Nganou, D. N., Durand, N., Teyssier, C., & Montet, D. (2016). Discrimination of post-harvest coffee processing methods by microbial ecology analyses. *Food Control*, 65, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.022>
- Higdon, J. V., & Frei, B. (2006). Coffee and Health: A Review of Recent Human Research. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), 101-123. <https://doi.org/10.1080/10408390500400009>
- Isquierdo, E., Borém, F., Andrade, E., Corrêa, J., Oliveira, P., & Alves, G. (2013). Drying Kinetics and Quality of Natural Coffee. *Transactions of the ASABE*, 56(3), 995–1001. <https://doi.org/10.13031/trans.56.9794>
- Kinton, V. (2005). Malt Beverages and Brewing Materials. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.ª ed., pp. 1-42). AOAC International.
- Knopp, S., Bytof, G., & Selmar, D. (2006). Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. *European Food Research and Technology*, 223(2), 195-201. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0172-1>
- Koshiro, Y., Jackson, M. C., Nagai, C., & Ashihara, H. (2015). Changes in the content of sugars and organic acids during ripening of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* fruits. *European Chemical Bulletin*, 4(8), 378–383. <https://www.eurchembull.com/?mno=66742>
- Malta, M. R., Rosa, S. D. V. F. D., Lima, P. M., Fassio, L. D. O., & Santos, J. B. (2013). Alterações na qualidade do café submetido a diferentes formas de processamento e secagem. *Revista Engenharia na Agricultura*, 21(5), 431–440. <https://doi.org/10.13083/reveng.v21i5.450>
- Marin, C., & Puerta, G. I. (2008). Contenido de ácidos clorogénicos en granos de *Coffea arabica* L. y *C. Canephora*, según el desarrollo del fruto. *Revista Cenicafé*, 59(1), 7–28. <http://hdl.handle.net/10778/60>
- Martinez, S. J., Batista, N. N., Bressani, A. P. P., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Molecular, Chemical, and Sensory Attributes Fingerprinting of Self-Induced Anaerobic Fermented Coffees from Different Altitudes and Processing Methods. *Foods*, 11(24), 3945. <https://doi.org/10.3390/foods11243945>
- Milla Flores, F. H., & Castro Luna, A. (2020). Evaluación del nivel contaminante de ocratoxina a (ota) mediante columnas de inmunoespecificidad y cromatografía líquida de alta eficiencia en coffeea arabica l. “Café”. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 86(2), 164–174. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v86i2.286>
- Nakayama, C. C., Teixeira, A. A., Teixeira, R. R., Reis, M., Monteiro, A., Bueno, J., & Taniwaki, M. H. (2020). Sucessão de microrganismos em diferentes estádios de secagem do café e sua influência na bebida. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 2402–2418. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-177>
- Nikolova-Damyanova, B., Velikova, R., & Jham, G. N. (1998). Lipid classes, fatty acid composition and

- triacylglycerol molecular species in crude coffee beans harvested in Brazil. *Food Research International*, 31(6–7), 479–486. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00016-2)
- Oestreich-Janzen, S. (2010). Chemistry of Coffee. En H.-W. Liu & L. Mander (Eds.), *Comprehensive Natural Products II* (Vol. 3, pp. 1085–1117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008045382-8.00708-5>
- Osorio Pérez, V., Matallana Pérez, L. G., Fernandez-Alduenda, M. R., Alvarez Barreto, C. I., Gallego Agudelo, C. P., & Montoya Restrepo, E. C. (2023). Chemical Composition and Sensory Quality of Coffee Fruits at Different Stages of Maturity. *Agronomy*, 13(2), 341. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020341>
- Osorio, V., Pabón, J., Shuler, J., & Fernández-Alduenda, M. R. (2022). Efecto de la combinación de procesos de secado en la calidad del café natural obtenido vía seca. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73101. <https://doi.org/10.38141/10778/73101>
- Pabón, J., Osorio, V., & Gallego, C. P. (2023). Inocuidad del café durante la interrupción del secado mecánico. *Revista Cenicafé*, 74(2), e74205. <https://doi.org/10.38141/10778/74205>
- Paterson, R. R. M., Lima, N., & Taniwaki, M. H. (2014). Coffee, mycotoxins and climate change. *Food Research International*, 61, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.037>
- Peñuela-Martínez, A. E., Pabón, J., & Sanz-Urbe, J. R. (2013). Método fermaestro: Para determinar la finalización de la fermentación del mucilago de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 431, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0431>
- Puerta, G. I. (2003). Prevenga la ochratoxina A y mantenga la inocuidad y la calidad del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 317, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0317>
- Puerta, G. I. (1996). Evaluación de la calidad del café colombiano procesado por vía seca. *Revista Cenicafé*, 47(2), 85–90. <http://hdl.handle.net/10778/63>
- Rendón, M. Y., de Jesus García Salva, T., & Bragagnolo, N. (2014). Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. *Food Chemistry*, 147, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.123>
- Santiago, W. D., Teixeira, A. R., Santiago, J. D. A., Lopes, A. C. A., Brandão, R. M., Caetano, A. R., Cardoso, M. D. G., & Resende, M. L. V. (2020). Development and validation of chromatographic methods to quantify organic compounds in green coffee (*Coffea arabica*) beans. *Australian Journal of Crop Science*, 14(08):2020, 1275–1282. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.08.p2433>
- Scholz, M. B. D. S., Prudencio, S. H., Kitzberger, C. S. G., & Silva, R. (2019). Physico-chemical characteristics and sensory attributes of coffee beans submitted to two post-harvest processes. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(1), 831–839. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9995-x>
- Silva, C., Batista, L., Abreu, L., Dias, E., & Schwan, R. (2008). Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica*) fermentation. *Food Microbiology*, 25(8), 951–957. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.07.003>
- Smrke, S., Kros拉克ova, 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>
- Vanesa, D., & Ana, P. (2013). Occurrence of Ochratoxin A in coffee beans, ground roasted coffee and soluble coffee and method validation. *Food Control*, 30(2), 675–678. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.004>
- Villarreal, D., Baena, L. M., & Posada, H. E. (2012). Análisis de lípidos y ácidos grasos en café verde de líneas avanzadas de *Coffea arabica* cultivadas en Colombia. *Revista Cenicafé*, 63(1), 19–40. <http://hdl.handle.net/10778/520>
- Vincent, J.-C. (1987). Green Coffee Processing. En R. J. Clarke & R. Macrae (Eds.), *Coffee* (pp. 1–33). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3417-7_1
- Wendt, N. J. (2005). Animal Feed. En W. Horwitz & G. W. Latimer (Eds.), *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18.^a ed., pp. 1–72). AOAC International.