

Principales adulterantes del café: implicaciones en la salud pública y métodos analíticos para su detección

Major coffee adulterants: Implications for public health and analytical methods for their detection

Kilmara Abrego-González ^{1,3}, Aracelly Vega Ríos  ^{1,4}, Estela Guerrero De León  ^{2,5}, Juan Antonio Morán-Pinzón  ^{2,6}.

¹Universidad Autónoma de Chiriquí. David. Panamá. ²Universidad de Panamá, Panamá. ³  kilmara.abrego@up.ac.pa; ⁴  aracelly.vega@unachi.ac.pa;
⁵  estela.guerrero@up.ac.pa; ⁶  juan.moran@up.ac.pa



DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v73n4.120328>

2024 | 73-4 p 399-411 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2025-05-12 Acep.: 2025-11-27

Resumen

La adulteración del café es un problema frecuente que viola las normas de seguridad alimentaria y representa un riesgo para la salud del consumidor, más allá de su posible impacto económico. Actualmente, existen leyes que buscan controlar la calidad en la producción y comercialización del café, sin embargo, su aplicación enfrenta limitaciones técnicas, como el tipo de adulterante a identificar, y económicas, como el costo de implementación de las técnicas analíticas. En este contexto, se desarrolló una revisión narrativa con el objetivo de compilar y analizar la evidencia científica más reciente sobre los principales adulterantes del café, sus efectos en la salud y los métodos analíticos empleados para su detección y control. La búsqueda bibliográfica se limitó a los últimos diez años e incluyó estudios experimentales y de revisión indexados en las bases de datos PubMed y Google Scholar. De los 53 artículos analizados se concluye que, aunque la mayoría de adulterantes son granos u otros alimentos, también se usan sustancias potencialmente peligrosas como fármacos y colorantes. Las regulaciones son más estrictas en países importadores y desarrollados, mientras que la falta de normativas en países productores facilita la adulteración y deja productos de menor calidad para el consumo local. Las técnicas basadas en análisis de ADN son las más prometedoras, aunque su implementación en países productores presenta desafíos técnicos y económicos.

Palabras clave: adulteración, café, calidad, legislación, trazabilidad.

Abstract

Coffee adulteration is a recurring issue that compromises food safety standards and poses significant risks to public health, extending beyond its economic implications. Although regulatory frameworks aim to ensure quality control in coffee production and commercialization, their effective implementation is often limited by technical challenges, such as the identification of specific adulterants, as well as by economic constraints related to the cost of suitable analytical methods.

In this context, a narrative review was conducted to compile and analyze the most recent scientific evidence on major coffee adulterants, their associated health effects, and the analytical methods employed for their detection and control. The literature search was limited to studies published within the last ten years and included both experimental and review articles indexed in the PubMed and Google Scholar databases. Analysis of 53 selected studies revealed that, although most adulterants are food-based, particularly other grains, there is also evidence of the use of potentially harmful substances, including pharmaceuticals and dyes. Regulatory frameworks tend to be more stringent in developed and coffee-importing countries, whereas the lack of comprehensive legislation in many producing nations facilitates adulteration and results in lower-quality products being distributed locally. DNA-based analytical techniques show promise for the detection of coffee adulteration; however, their implementation in producing countries remains limited due to technical and financial barriers.

Keywords: Adulteration, coffee, legislation, quality, traceability.

Introducción

Los granos de café, ya sean verdes o tostados, se utilizan en bebidas que se consumen en el mundo por diversas razones, ya sea por sus beneficios para la salud, como bebida estimulante o por placer (Núñez et al., 2020). Sin embargo, la gran popularidad del café también lo ha convertido en objeto de adulteración, práctica que consiste en añadir, intencionadamente, sustancias de calidad inferior o perjudiciales (De Carvalho Couto et al., 2022). En particular, el café adulterado está diseñado para compensar los altos precios, la escasez o la reducción de los costos de producción (Flores-Valdez et al., 2020; Toci et al., 2016). Los adulterantes pueden infiltrarse en la cadena de suministro del café desde el cultivo hasta el procesamiento y la distribución (Flores-Valdez et al., 2020). Con relación al café tostado y molido, a menudo son adulterados empleando cereales tostados, los cuales son añadidos para aumentar el peso del café y reducir su costo (De Carvalho Couto et al., 2022; Flores-Valdez et al., 2020; Sezer et al., 2018; Tibola et al., 2018; Toci et al., 2016); otras prácticas de adulteración incluyen la adición de cáscaras de café o la incorporación de tintas para alterar su color. Estas últimas prácticas no solo constituyen un fraude, sino que también representan un riesgo para la salud, ya que las cáscaras pueden contener residuos de plaguicidas, mientras que los componentes de las tintas son considerados tóxicos (Asensio et al., 2019; Ferreira et al., 2021).

Además de las adulteraciones, la calidad del producto final puede ser afectada por otros factores como son la frescura de los granos de café, la proporción de granos defectuosos y el tipo de proceso de tostión y molienda. Debido a estos factores, y teniendo en cuenta que tras el tostado y la molienda la adición de adulterantes no puede detectarse visualmente, la investigación y regulación de la adulteración del café tostado y molido es compleja (Toci et al., 2016).

Sin que nada justifique la práctica fraudulenta, la adulteración del café plantea además importantes amenazas para la salud pública. El consumo de café adulterado puede provocar una serie de efectos adversos para la salud (Klikarová y Česlová, 2022), como molestias gastrointestinales y reacciones alérgicas (Asensio et al., 2019; Ferreira et al., 2016; Mendes y Duarte, 2021), lo que exige la implementación de medidas estrictas para salvaguardar la calidad del producto y la protección del consumidor.

Abordar el problema del fraude en la industria del café requiere un enfoque global que abarque la aplicación de la normativa, la incorporación de los avances tecnológicos y la educación de los consumidores. La presente revisión se centra, principalmente, en el café comercial o commodity, que representa la mayor proporción del mercado global, y

busca presentar las características de los principales adulterantes del café, sus efectos en la salud y resume las regulaciones que emmarcan el rubro. El objetivo es exponer la necesidad de implementar técnicas analíticas que aseguren la calidad e inocuidad del producto.

Metodología

La presente revisión narrativa se elaboró garantizando el rigor, la transparencia y la reproducibilidad en revisiones de literatura no sistemáticas (Ferrari, 2015). La recopilación de la información se llevó a cabo entre octubre de 2023 y julio de 2024.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos PubMed y Google Scholar, limitando los resultados a publicaciones comprendidas entre 2014 y 2024. Se emplearon descriptores del tesoro MeSH (Medical Subject Headings) y términos libres relacionados con la adulteración del café, su detección y sus implicaciones para la salud pública. La estrategia combinó operadores booleanos (AND, OR, NOT) para refinar los resultados, utilizando comillas para frases exactas. La ecuación de búsqueda principal fue: (“coffee” OR “Coffea”) AND (“adulteration” OR “food fraud” OR “food authenticity”) AND (“public health” OR “food safety” OR “food quality”) AND (“detection method” OR “analytical methods”).

Además, se ejecutaron búsquedas específicas combinando términos de interés, como “Coffee AND Adulteration”, “Coffee Adulteration AND Detection method”, “Coffee Adulteration AND Public Health”, “Coffee AND Food Fraud” y “Coffee AND Food Quality”.

En total, se identificaron 81 artículos experimentales y 33 artículos de revisión. Tras eliminar duplicados y documentos irrelevantes (por ejemplo, aquellos centrados en otras bebidas o sin evidencia analítica), se seleccionaron 53 publicaciones que cumplieron con los criterios de inclusión: (1) artículos originales o de revisión con enfoque en adulteración del café, (2) estudios con metodología analítica o evaluación de impacto en salud pública y (3) publicaciones revisadas por pares en inglés o español.

Los artículos seleccionados se clasificaron de acuerdo con el tipo de adulterante, el método analítico utilizado y las implicaciones para la salud pública, con el propósito de estructurar una síntesis integradora de los hallazgos más relevantes.

Resultados

En las bases de datos PubMed y Google Scholar se identificaron 81 artículos científicos experimentales y 33 artículos de revisión relevantes. Tras una depuración exhaustiva para eliminar duplicados, se llegó a una selección de 53 publicaciones totales que conforman la base de esta revisión (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados obtenidos luego de la selección de artículos para la revisión

| Búsqueda booleana (términos de búsqueda) | PubMed/Google Scholar (seleccionados/ reportados) | |
|---|--|-----------------------|
| | Artículos científicos | Artículos de revisión |
| Coffee AND Adulteration | 14/71 | 3/15 |
| Coffee Adulteration AND Detection method | 7/37 | 1/9 |
| Coffee Adulteration AND Public Health | 3/42 | 2/6 |
| Coffee AND Food Fraud | 4/29 | 0/7 |
| Coffee AND Food Quality | 18/951 | 1/115 |
| Total | 46 | 7 |

Fuente: elaboración propia.

Para el resto de las búsquedas, incluidas "Coffee AND Food Fraud" y "Coffee AND Food Quality", los resultados obtenidos no ampliaron los artículos seleccionados.

Adulteración del café: tipos, características y riesgos asociados para la salud

El café se considera mundialmente como la bebida más popular. Actualmente, este producto despierta interés no solo entre los consumidores, sino también en la comunidad científica y en los organismos regulatorios que buscan garantizar la calidad alimentaria en beneficio de la salud pública. En la industria cafetera, los casos de adulteración no suelen causar daños a la salud cuando los adulterantes son otro tipo de alimentos (como cebada o maíz), sin embargo, sus atributos pueden verse alterados al aumentar o disminuir el valor nutricional o su capacidad antioxidante (Ferreira et al., 2016). De forma específica, se describe que la adulteración de café con maíz reduce la actividad antioxidante, lo cual se asocia a un menor contenido de polifenoles en comparación al café puro (Vega et al., 2017).

Cuando nos referimos a casos de adulteración que pueden poner en riesgo la salud, encontramos aquellos adulterantes conocidos como alérgenos que generan intolerancia y sensibilidad (nueces, trigo o semillas). Un ejemplo de este tipo se evidenció en un café en polvo sustituido por polvo de semilla de dátil o tamarindo y polvo de achicoria; este último puede provocar diarrea, trastornos estomacales, vértigo y dolores articulares. Otro caso de adulteración mostró cafés molidos identificados con un alto contenido de almidón o azúcar, lo que implica que el café fue adulterado con cereales tostados como la escarda, el maíz, la soja o la cáscara de café (Klikarová y Česlová, 2022; Mendes y Duarte, 2021).

Otros tipos de adulteración que pueden poner en riesgo la salud son los que utilizan sustancias no alimentarias. Tal es el caso en el que se identificó café adulterado con sibutramina, en donde los pacientes desarrollaron cuadros de psicosis grave, hipomanía

y niveles anormales de enzimas hepáticas tras su consumo (Bertholee et al., 2013). También, durante la investigación forense de un caso de envenenamiento se reportó la adulteración de una bebida de café enlatada con nitrito de isobutilo, el cual, por diversas reacciones químicas, produce nitrato y cianuro (Seto et al., 2000). Asensio et al. (2019) exponen que el decalaje de las tintas de impresión presentes en las tazas de cartón utilizadas en las máquinas expendedoras de café contienen varios compuestos que están clasificados como Clase II y Clase III según las normas de Cramer. Este reporte encaja en la categoría de riesgo para la salud.

Independientemente de si la adulteración supone un riesgo menor o mayor para la salud, el consumidor tiene derecho a saber lo que compra y consume, sobre todo cuando el alimento se sustituye o adultera por otros de menor valor nutricional o comercial (Ferreira et al., 2016). Esto revela la gran necesidad de controlar la autenticidad y el origen de las muestras de café para evitar fraudes y daños en la salud (Núñez et al., 2020).

Adulterantes del grano de café y fraudes comerciales

En la actualidad, los consumidores pueden conseguir con mayor facilidad la presentación del café en granos, que se comercializa haciendo énfasis en su origen y especialidad. Los granos de café pueden sufrir modificaciones en su apariencia física mediante el uso de sustancias contaminantes; este es otro tipo de adulteración que puede sufrir este producto. Otra práctica de adulteración utilizada para disfrazar defectos o para hacer que un alimento parezca más fresco o de mayor calidad es abrillantar los alimentos. En el caso del café, se reportan procesos de glaseado con parafina, aceite vegetal o azúcar morena para mejorar las características organolépticas del grano (Ferreira et al., 2021). Sin embargo, una práctica peligrosa puede ser la alteración del color de los granos empleando colorantes con potencial tóxico como cromatos de plomo y zinc, óxido férrico, arseniato de cobre y carbón vegetal, entre otros (Ferreira et al., 2021; Toci et al., 2016).

En la industria de las confiterías, se reportaron granos de café artificial, moldeados y aromatizados con una solución de caramelo o chocolate. Esta práctica continuó en muchos países hasta que fue restringida por las adulteraciones a las que se sometían los granos empleados (Ferreira et al., 2021).

Con el objetivo de incrementar sus ganancias, algunos productores recurren a falsificar el origen del café en el etiquetado. Este fraude consiste en atribuir falsamente a los granos una procedencia de renombre o clasificarlos como cafés de especialidad cuando en realidad no cumplen con los estándares exigidos (Ferreira et al., 2021; Tibola et al., 2018; Toci et al., 2016).

Adulterantes del café tostado y molido

El fraude en el café tostado y molido ha presentado múltiples formas a través de los tiempos, siendo la más habitual la adición de impurezas y sustancias de bajo costo para aumentar su volumen (Toci *et al.*, 2016)which require pretreatment of samples and are time-consuming and subjective. Other analytical techniques have been studied that might be more reliable, reproducible, and widely applicable. The present review provides an overview of three analytical approaches (physical, chemical, and biological). La achicoria, seguida por el maíz y otros granos, son posiblemente las adulteraciones más recurrentes y tienen como finalidad aumentar el peso del café y reducir su costo de producción. Así, la lista de adulterantes del café es amplia e incluye una gran cantidad de productos alimenticios utilizados, algunos de los cuales se detallan en la Tabla 2 y en la Figura 1.

Dado que las características fisicoquímicas de los adulterantes después del tostado son similares a las del café molido, la identificación de estas sustancias representa un desafío para las autoridades regulatorias, y aún más para el propio consumidor (Xie y Tan, 2022).

Regulaciones sobre la adulteración de café

Por más de dos siglos, el café ha sido objeto de adulteraciones, lo que ha llevado a establecer regulaciones para asegurar su calidad. Dentro de estas normativas está el Codex Alimentarius, cuyo propósito es garantizar alimentos seguros, sin adulteraciones

y correctamente etiquetados (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], s.f.). A través de normas y recomendaciones se promueve su adopción por parte de los gobiernos. En el caso del café, el Codex se enfoca en la inocuidad de los granos al regular los niveles de plaguicidas y contaminantes, sin mencionar específicamente los adulterantes.

Según datos de la Organización Internacional del Café (ICO, por sus siglas en inglés), los cinco países que más exportan este rubro son Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Honduras, mientras que las zonas de mayor consumo en el mundo son la Unión Europea (especialmente los países nórdicos) y Estados Unidos (Pradana-López *et al.*, 2021). La ICO y sus miembros, a partir del Acuerdo Internacional del Café firmado en 2007, sugieren la prohibición de venta y publicidad de productos con el nombre de café, si dichos productos contienen menos del equivalente al 95 % de café verde como materia prima básica (ICO, 2008).

Entre los países productores que han establecido regulaciones específicas para las adulteraciones del café se encuentran Brasil y Colombia. El primero empezó con regulaciones técnicas para la identificación y calidad del café, reglamentando que los granos de café tostados y molidos no pueden contener impurezas, sedimentos y materias extrañas superiores o iguales al 1 %. Esta legislación sirvió para que la Asociación Brasileña de Industrias de Café promovieran la creación del programa de calidad del café, pero esta iniciativa no ha sido apoyada completamente por algunas industrias brasileñas (Toci *et al.*, 2016)which require pretreatment of samples and are time-consuming and subjective. Other analytical techniques have been studied

Tabla 2. Principales adulterantes del café tostado y molido reportados en la literatura

| Tipo de alimento | Adulterante | Referencia |
|-------------------------|---|---|
| Cereales | Trigo, arroz, centeno, avena, alforfón, cebada, salvado, cebada, malta —con o sin impregnación de azúcar caramelizado—, melaza, almidón | Chen <i>et al.</i> , 2023; De Carvalho Couto <i>et al.</i> , 2022; Ferreira <i>et al.</i> , 2021; Flores-Valdez <i>et al.</i> , 2020; Kamiloglu, 2019; Sezer <i>et al.</i> , 2018; Tibola <i>et al.</i> , 2018; Toci <i>et al.</i> , 2016 |
| Semillas de legumbres | Soya, guisantes, semillas de altramuz, garbanzos, casia, algarroba, fenogreco, semillas de la retama | Chen <i>et al.</i> , 2023; De Carvalho Couto <i>et al.</i> , 2022; Ferreira <i>et al.</i> , 2021; Flores-Valdez <i>et al.</i> , 2020; Kamiloglu, 2019; Sezer <i>et al.</i> , 2018; Tibola <i>et al.</i> , 2018; Toci <i>et al.</i> , 2016 |
| Raíces | Achicoria, betabel, diente de león | Chen <i>et al.</i> , 2023; Ferreira <i>et al.</i> , 2021; Kamiloglu, 2019; Toci <i>et al.</i> , 2016 |
| Hortalizas | Boniatos, patatas, nabos, remolachas, zanahorias | Ferreira <i>et al.</i> , 2021; Kamiloglu, 2019 |
| Frutos secos y semillas | Almendras, nueces de marfil, cacahuetes, castañas, nueces de cola, castañas de indias, bellotas, semillas de girasol, semillas de algodón, semillas de uva, semillas de iris de árboles, semillas de açai | Ferreira <i>et al.</i> , 2021; Kamiloglu, 2019 |
| Frutas | Higos, ciruelas pasas, bayas de enebro, plátanos, peras secas, dátiles, cortezas de cítricos, cáscaras de cacao | Ferreira <i>et al.</i> , 2021; Kamiloglu, 2019 |

Fuente: elaboración propia.



Figura 1. Resumen de las principales adulteraciones que se presentan en el café tostado en grano y molido.
Fuente: elaboración propia.

that might be more reliable, reproducible, and widely applicable. The present review provides an overview of three analytical approaches (physical, chemical, and biological). Por su parte, Colombia estableció la prohibición de venta dentro de su territorio de productos que contengan menos del 100 % de café (Ferreira et al., 2021). Sin embargo, este país sudamericano, a través de la Resolución 3626 de 2007, estableció otras regulaciones para los productores/comercializadores de café; esta normativa guarda relación con el registro sanitario, inspección fitosanitaria y otras obligaciones que estos deben cumplir durante la dedicación a la producción del café (ICA, 2007). Inicialmente, la normativa estaba bajo la responsabilidad del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y hoy involucra a varias instituciones como el Invima, la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) y el Icontec, organismos que en conjunto garantizan la seguridad alimentaria y la calidad del producto.

En los últimos años, Panamá y otros países centroamericanos han ganado reconocimiento por la producción de cafés de especialidad, como el geisha panameño. No obstante, en Panamá aún no existe una normativa oficial sobre la calidad y el etiquetado del producto, y la Ley 326 de 2022 se limita a promover la producción, procesamiento y desarrollo del cultivo de café (República de Panamá, 2022).

Con relación a los países consumidores/importadores, la Unión Europea (UE) introdujo una legislación que presenta nombres específicos para productos agrícolas, alimentos y bebidas con características de calidad distintivas en virtud del Reglamento del Consejo EEC N°2081/92, que incluye la Denominación de Origen Protegida (DOP), el Origen Geográfico Protegido (OGP) y las Especialidades

Tradicionales Garantizadas (ETG)(Reglamento CEE N° 2081/92, 1992). Estos esquemas de calidad de la UE se desarrollaron para proteger la reputación de los alimentos regionales, beneficiar a los productores al obtener un precio superior por sus productos auténticos y minimizar los cálculos engañosos de los productos fraudulentos (Markos et al., 2023).

En el caso de Estados Unidos, la regulación sobre el café establece un envasado en recipientes comercialmente aceptables, aptos para su uso por parte de los gobiernos federal, estatales, locales y otras partes interesadas (U.S. Department of Agriculture, 2004). Esta legislación incluye clasificaciones de acuerdo con el origen (país), sus mezclas y las características particulares del grano de café. Adicionalmente, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) incluye otras directrices relacionadas con el café y sus adulteraciones por presencia de insectos y mohos, además de contaminación con otros materiales extraños (FDA, 2017).

En décadas recientes, Japón se ha convertido en uno de los principales importadores y consumidores de café, por lo que ha establecido regulaciones estrictas sobre este producto. Así, en el mercado japonés está prohibida la venta de cualquier producto que, bajo el nombre de café, contenga aditivos o sustitutos distintos al café (Roldán-Pérez, 2008).

Métodos para detectar la adulteración de café

La evaluación de la adulteración del café abarca el análisis del grano verde, del café tostado y del tostado y molido, que son las principales formas en las que se encuentra en el mercado (Chen

et al., 2023), lo que las convierte en variables a considerar al desarrollar la metodología. Las técnicas analíticas empleadas para detectar adulterantes en el café han sido clasificadas en la literatura según distintos criterios. Toci et al. (2016) agrupan estas metodologías en tres categorías: físicas, químicas y biológicas. De manera complementaria, Perez et al., (2023) distingue tres enfoques analíticos: la diferenciación entre especies arábica y robusta, la determinación del origen geográfico y la detección de adulteraciones con otros alimentos o subproductos del café. En la literatura reciente, se reconocen dos estrategias analíticas principales: el enfoque selectivo o dirigido (“perfil químico”) y el no selectivo o no dirigido (“huella digital”) (Chen et al., 2023; Farag et al., 2022; Wang et al., 2020). El enfoque de huella digital se basa en un análisis no dirigido que busca registrar el mayor número posible de metabolitos, sin identificarlos individualmente, mientras que el perfil químico se orienta a la identificación y cuantificación de metabolitos relacionados con la adulteración (Wang et al., 2020). En el contexto de la autenticación del café, ambos enfoques se apoyan en técnicas analíticas basadas en principios químicos, biomoleculares e isotópicos, y el perfil químico ofrece una caracterización más detallada de las muestras analizadas (Burns y Walker, 2020; Ferreira et al., 2016, 2021; Wang et al., 2020).

Tomando como referencia los aportes de las revisiones previamente descritas y los datos proporcionados por estudios experimentales, podemos señalar que este artículo fue desarrollado bajo un enfoque dirigido a ofrecer un análisis del aporte de las técnicas y metodologías analíticas empleadas en la (1) detección, identificación y cuantificación de los principales adulterantes del café, (2) diferenciación de las variedades de café y regiones de producción y (3) detección de adulterantes y contaminantes potencialmente tóxicos. Los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica se presentan resumidos a continuación (Tablas 3, 4 y 5), agrupados según la técnica empleada, el tipo de adulteración evaluada y los principales hallazgos reportados.

Discusión

La presente revisión describe los principales adulterantes que afectan la calidad del café, con énfasis en las metodologías empleadas para su identificación. Se evidencia que los adulterantes más frecuentes corresponden a cereales como maíz, cebada y arroz, los cuales no solo alteran el perfil sensorial del café, sino que también pueden modificar su valor nutricional y propiedades nutracéuticas, reduciendo los beneficios asociados a su consumo (Ferreira et al., 2021; Vega et al., 2017).

El análisis de los métodos de detección revela una amplia diversidad de enfoques que reflejan la complejidad de esta tarea. Las técnicas empleadas van desde métodos convencionales como HPLC y espectroscopía UV-Vis (Song et al., 2019) hasta estrategias más avanzadas, como la resonancia magnética nuclear (RMN) y la espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS) (Milani et al., 2020; Sezer et al., 2018). Cada método presenta ventajas y limitaciones específicas según el tipo de adulterante, la precisión requerida y la disponibilidad de infraestructura y personal especializado, lo que condiciona su factibilidad de aplicación. En este contexto, la combinación de quimiometría con métodos tradicionales y avanzados ha demostrado mejorar significativamente la eficacia y precisión en la detección (Flores-Valdez et al., 2020; Yulia y Suhandy, 2021).

Desde la perspectiva de la salud pública, aunque la mayoría de los adulterantes son de origen alimentario y no representan riesgos inmediatos, se han documentado casos de adulteración con sustancias farmacológicamente activas, como la sibutramina, que pueden generar efectos adversos graves. La aplicación de técnicas como FTIR-ATR, combinada con quimiometría, ha mostrado alta eficacia para detectar este tipo de compuestos, lo que destaca la necesidad de adoptar tecnologías capaces de identificar tanto adulterantes alimentarios como sustancias potencialmente tóxicas (Cebi et al., 2017).

Pese a los avances metodológicos, el campo enfrenta limitaciones importantes, entre ellas la falta de métodos multielementales capaces de detectar simultáneamente una amplia gama de adulterantes. Asimismo, las técnicas de control de calidad rutinario presentan restricciones: la inspección visual resulta insuficiente para identificar adulteraciones, y aunque la microscopía se emplea en el análisis de café tostado molido, el color oscuro y la reducción del tamaño de partícula dificultan su eficacia (De Carvalho Couto et al., 2022; Ferreira et al., 2021; Sezer et al., 2018). En métodos más avanzados, como los cromatográficos y electroforéticos, la detección puede verse afectada por factores como el efecto matriz, el grado de tueste, el tratamiento de la muestra o los altos límites de detección en muestras comerciales (Chen et al., 2023; Martins et al., 2018; Perez et al., 2023; Toci et al., 2016; Wang et al., 2020). Además, muchos de estos métodos aún no han sido validados ni probados en muestras comerciales reales (Ferreira et al., 2021).

Entre las estrategias emergentes, los métodos basados en ADN destacan por su alta especificidad y bajos límites de detección y cuantificación, aunque su sensibilidad disminuye conforme aumenta el grado de tueste del grano (Ferreira et al., 2021). En conjunto, el análisis de la literatura evidencia un progreso sostenido en el desarrollo de métodos analíticos más robustos y en la creación de regulaciones

Tabla 3. Principales metodologías reportadas para la detección, identificación y cuantificación de adulterantes más comunes en el café

| Técnica | Adulteración | Hallazgos | Referencia |
|---|--|---|----------------------------------|
| SPME-GC-MS | Cáscaras de café, soja y arroz | En muestras representativas de las principales especies de café comercializadas se identificaron 11 compuestos volátiles candidatos como marcadores para detectar fraude. | (De Carvalho Couto et al., 2024) |
| CE-MS/MS | Soja y maíz | Utilizaron el análisis de componentes principales (ACP) para evaluar las interrelaciones entre el perfil de monosacáridos y la adulteración intencional de muestras de café árabe con soja y maíz. Fucosa, xilosa y glucosa son marcadores potenciales para identificar la adulteración en café. | (Daniel et al., 2018) |
| UV-Vis + quimiometría | Maíz | La espectroscopía UV-Vis y el modelo PLSR global (regresión por mínimos cuadrados parciales) propuestos detectaron una mezcla intencional de maíz en el café tostado molido de Peaberry en un rango de 10 % a 50 %. El uso del modelo PLSR global es mejor para predecir el nivel del maíz como adulterante. | (Yulia y Suhandy, 2021) |
| HPLC + quimiometría | Soja y frijoles mungo | El análisis quimiométrico basado en HPLC fue capaz de detectar la adulteración intencional del café con granos. Resultados fiables se obtuvieron en la discriminación del café y del café adulterado. | (Cheah y Fang, 2020) |
| HPLC-UV-VIS | Cebada, trigo y arroz | La glucosa podría ser el mejor índice químico predominante, entre los examinados, para distinguir el café puro del café adulterado con contaminantes de cebada, trigo y arroz. El límite de discriminación de la muestra de café con trigo fue del 1 %, utilizando ramnosa y glucosa. | (Song et al., 2019) |
| HPLC y por detección amperométrica y por derivatización post-columna UV-Vis | Semillas de triticale y açaí | Se estimó que HPLC-HPAEC-PAD es más rápido y fácil de operar que la derivatización post-columna HPLC-UV-Vis. HPLC-HPAEC-PAD demostró ser superior para la cuantificación y previsión mediante modelos matemáticos y posee mejor perfil para ser utilizado en el cribado rutinario de adulterantes. Las muestras fueron adulteradas intencionalmente. | (Domingues et al., 2014) |
| HPLC y NIR | Maíz | HPLC y NIR mostraron una sensibilidad aproximada al 5 % para la detección de la adulteración intencional con maíz. La aplicación y optimización de métodos de procesamiento espectral puede mejorar mucho la sensibilidad de la NIR. | (Winkler-Moser et al., 2015) |
| UPLC-HRMS | Soja y arroz | La estrategia fue propuesta para determinar el perfil de oligosacáridos UPLC-HRMS en el café molido comercial. Junto con un análisis estadístico integrado, se identificaron 17 composiciones de oligosacáridos como marcadores para identificar soja y arroz en el café molido. | (Cai et al., 2016) |
| HPLC-HPAEC-PAD + quimiometría | Soja y trigo | El enfoque HPLC-HPAEC-PAD, asociado con la quimiometría, permitió detectar polisacáridos de granos crudos (muestra donada), lo que confirma la propuesta de métodos conjuntos como una herramienta analítica factible para la detección de adulterantes en café tostado molido. | (Pauli et al., 2014) |
| FTIR-ATR | Maíz, cáscaras de café, posos o borra de café y cebada | Se mezclaron intencionalmente muestras de café tostado con diferentes adulterantes (0.5 y 66 % p/p). Los resultados avalan que FTIR-ATR puede ser una herramienta analítica valiosa para la cuantificación de la adulteración en el café tostado y molido. | (Reis et al., 2016) |
| FT-MIR + quimiometría | Maíz, cebada, soja, avena, arroz y cáscaras de café | El método de espectroscopía FT-MIR, combinado con quimiometría, permitió identificar, con una precisión del 100 %, muestras de café puras así como las intencionalmente adulteradas con maíz, cebada, soja, avena, arroz y cáscaras de café (1 al 30 %). | (Flores-Valdez et al., 2020) |
| DSC y FTIR-ATR | Maíz | Se analizaron las muestras de café con maíz (0.5 y 40 % p/p) adulteradas intencionalmente. Como conclusión, DSC y FTIR son técnicas complementarias que pueden ofrecer una huella digital reproducible para fines de detección y cuantificación de adulteración. | (Brondi et al., 2017) |
| Espectroscopía de fluorescencia sincrónica frontal | Maíz y soja | La espectroscopía de fluorescencia sincrónica frontal se limita al cribado preliminar de café tostado con el mismo grado de tueste y adulterado intencionalmente con cantidades relativamente grandes de harinas de cereales tostados. Esta técnica no permite determinar una adulteración por debajo del 10 %. | (Xie y Tan, 2022) |
| LIBS + quimiometría | Trigo, maíz y garbanzo | LIBS, combinada con métodos quimiométricos, tiene potencial para ser utilizada como técnica de rutina en la detección e identificación de adulterantes en muestras de café tostado molido. LIBS podría utilizarse para identificar adulterantes como trigo, maíz y garbanzos en el café robusta. | (Sezer et al., 2018) |
| RMN H ¹ | Maíz, cebada, soja y cáscaras de café | RMN H ¹ es empleado para comprobar la adulteración en café tostado. Las muestras utilizadas fueron un conjunto de mezclas comerciales de árabe brasileño producidas a partir de granos de buena calidad en taza y cuatro adulterantes (maíz, cáscara de café, cebada y soja). La metodología fue efectiva para todos los adulterantes analizados en 31 muestras comerciales. | (De Moura Ribeiro et al., 2017) |
| RMN H ¹ + quimiometría | Maíz, cebada, cáscaras de café, soja, arroz y trigo | Se exploró la versatilidad de la RMN H ¹ asistida con herramientas quimiométricas. RMN H ¹ es una técnica analítica capaz de determinar la cantidad de adulterante presente en una muestra de café comercial. El enfoque quimiométrico empleado con la modelización suave e independiente de analogías de clase (SIMCA) logró altas tasas de predicción. El empleo conjunto de las herramientas hace que la autenticación de este tipo de muestras sea más fácil y confiable. | (Milani et al., 2020) |

Continua en la siguiente página

**Tabla 3.** Principales metodologías reportadas para la detección, identificación y cuantificación de adulterantes más comunes en el café

| Técnica | Adulteración | Hallazgos | Referencia |
|--|---|---|--------------------------|
| Lengua electrónica voltámetro-métrica | Maíz y soja | La lengua electrónica voltámetro-métrica permite el análisis suficiente de muestras de café adulteradas con maíz y soja tostados, arrojando información cuantitativa que puede ser empleada para predecir la concentración de adulterantes en muestras de café mediante el uso de modelos de regresión. | (Arrieta et al., 2019) |
| Lengua electrónica voltámetro-métrica + quimiometría | Cáscaras y palitos de café, evaluar la condición de vida útil | Los métodos de reconocimiento de patrones: análisis discriminante lineal (LDA) con selección de variables mediante algoritmo de proyecciones sucesivas (APS) o algoritmo genético (AG) y análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) son propuestos para el análisis <i>in situ</i> de adulterantes del café. También podrían aplicarse en laboratorios con menos infraestructura, mediante el uso de un potenciómetro portátil, obteniendo una prueba local, rápida y de bajo costo de la adulteración del café, que posteriormente puede verificarse mediante métodos oficiales. | (De Morais et al., 2019) |
| PCR en tiempo real | Cebada, maíz y arroz | La PCR en tiempo real demostró ser adecuada para la detección y cuantificación de adulterantes alimentarios en cafés comerciales tostados molidos y solubles intencionalmente adulterados. | (Ferreira et al., 2016) |

CE-MS/MS: electroforesis capilar-espectrometría de masas en tandem; DSC: calorimetría diferencial de barrido; FTIR-ATR: infrarrojo por transformada de Fourier-Reflectancia total atenuada; FT-MIR: espectroscopía por transformada de Fourier en el infrarrojo medio; GC: cromatografía de gases; HPAEC-PAD: cromatografía de intercambio aniónico de alto rendimiento con detector amperométrico pulsado; HPLC: cromatografía líquida de alto rendimiento; LIBS: espectroscopía de descomposición inducida por láser; MS: espectrometría de masas; NIR: infrarrojo cercano; PCR: reacción en cadena de la polimerasa; RMN H¹: resonancia magnética nuclear de protones; SPME: microextracción en fase sólida; UPLC-HRMS: cromatografía líquida de ultra alto rendimiento acoplada a la espectrometría de masas de alta resolución; UV-Vis: ultravioleta-visible. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Principales metodologías reportadas para la diferenciación entre variedades de café y regiones de producción

| Técnica | Adulteración | Hallazgos | Referencia |
|--------------------------------|---|--|--------------------------|
| Imágenes multiespectrales | Café arábica y robusta | El enfoque utilizado permitió realizar un rápido cribado para identificar muestras de café comercial sospechosas, antes de recurrir a técnicas confirmatorias. Para demostrar la solidez del método se estima necesario ampliar la cantidad de muestras de café auténtico de distintos orígenes geográficos. | (Mihailova et al., 2022) |
| MS + quimiometría | Distintos orígenes | Se detectaron compuestos volátiles en el aroma del café utilizando dispositivo de muestreo de cortina de aire y se acopló a espectrometría de masas de ionización por descarga de corona por autoaspiración (SACDI-MS) para evitar la mezcla de volátiles y la superposición de señales. Los datos MS adquiridos se procesaron utilizando un algoritmo de aprendizaje profundo personalizado para realizar la autenticación del origen de forma automática. Se logró una precisión del 99.78 % en la clasificación de muestras de café de seis orígenes con un rendimiento de una muestra por segundo. | (Yang et al., 2024) |
| GC-MS + quimiometría | Mezclas de variedades de café | A través de la captación de perfiles cromatográficos obtenidos por cromatografía GC/MS se creó el modelo quimiométrico empleando la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para correlacionar la huella química, asociada con el aroma, con el grado de adulteración. La metodología propuesta detectó fraude de hasta el 1 % p/p de adulterante y determinó con precisión el grado de adulteración del café comercial. | (Toledo et al., 2014) |
| GC-MS + Metabolómica | Mezclas en café de especialidad | La cuantificación de metabolitos relevantes como el ácido cítrico y el ácido málico verificó la aplicabilidad del modelo de predicción para su uso práctico en la evaluación de la autenticidad del café comercial de civeta. El resultado mostró la aplicación del pretratamiento de datos en la técnica de predicción multivariante para la estimación precisa de la fracción de café en mezclas y su relevancia para la adulteración de café especial. | (Jumhawan et al., 2016) |
| LC-HRMS + quimiometría | Café arábica y robusta de diferentes regiones de producción | El estudio se realizó con regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) y demostró la capacidad de la metodología propuesta para cuantificar niveles de adulterantes de hasta el 15 %. Las huellas dactilares metabólicas LC-HRMS no dirigidas propuestas pueden emplearse para evaluar la adulteración del café, así como para detectar prácticas fraudulentas en el café. | (Núñez et al., 2024) |
| UHPLC-CAD y UHPLC-FLD | Mezclas de variedades de café | Las metodologías utilizadas distinguieron con éxito las variantes de arábica y robusta en muestras intencionalmente adulteradas, basándose en sus perfiles de tocopheroles y triacilgliceroles (TAG). Los TAG fueron particularmente eficaces para discriminar los orígenes del café arábica, mientras que los tocopheroles permiten la diferenciación del origen del café robusta. Es necesario ampliar el tamaño de la muestra y validar las metodologías para futuras investigaciones sobre el fraude y la autenticidad del café. | (Ismaiel et al., 2023) |
| UHPLC-(Q)Tof MS + quimiometría | Distintos orígenes | Los resultados obtenidos de 13 compuestos diferentes separan correctamente las muestras de café verde según su origen y sugieren que la metabolómica basada en UHPLC-(Q)Tof MS es un enfoque adecuado para la discriminación del origen del café verde. | (Hoyos et al., 2018) |

Continua en la siguiente página



Tabla 4. Principales metodologías reportadas para la diferenciación entre variedades de café y regiones de producción

| Técnica | Adulteración | Hallazgos | Referencia |
|---|---|--|--|
| Espectrómetro de bolsillo (740-1070 nm) + quimiometría | Café arábica y robusta de diferentes regiones de producción | Las muestras fueron escaneadas en las longitudes de onda de 740-1070 nm y los datos espirituales se trataron con varios métodos: centrado medio (MC), corrección de dispersión multiplicativa (MSC), primera derivada (FD), segunda derivada (SD) y variable normal estándar (SNV) de forma independiente. El análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), el vecino más cercano (KNN) y la máquina de vectores de soporte (SVM) se utilizaron para construir los modelos comparativos de predicción para los granos de café crudo, tostado y molido. La combinación de los métodos permite inferir en su potencialidad para proporcionar una autenticación precisa y rápida de diferentes variedades de café. | (Boadu et al., 2022) |
| IR | Mezclas de café | El método desarrollado por espectroscopía infrarroja resulta de utilidad cuando el arábica se mezcla intencionalmente con más del 20 % de robusta. | (Cestari, 2021) |
| NIR + quimiometría | Autenticidad del café arábico | La espectroscopía combinada con el análisis de componentes principales y un algoritmo de aprendizaje automático (red neuronal artificial) basado en un perceptrón multicapa, fueron utilizados para verificar la autenticidad del café arábica recogido en mercados locales de cuatro orígenes geográficos. Los resultados demostraron un enfoque preciso y no destructivo para autenticar el origen del café arábica. | (Dharmawan et al., 2023) |
| NIR e imágenes digitales | Mezclas de variedades de café | Las metodologías propuestas pueden ser utilizadas como herramientas rápidas, no destructivas, no invasivas y económicas para autenticar muestras intencionalmente adulteradas de café tostado molido gourmet y prevenir su etiquetado fraudulento. | (De Araújo et al., 2021) this work proposes the suitability of NIR spectroscopy and Digital Images (from CACHAS) |
| NIR + quimiometría | Trazabilidad de granos de café verde | Se utilizó el potencial de la NIR junto con la quimiometría como herramienta para evaluar la trazabilidad de los granos de café verde de diversos orígenes. Se evaluó la información contenida en los espectros NIR de granos enteros de café verde y se desarrollaron modelos químicos que mostraron capacidad para predecir con exactitud el origen geográfico de las muestras de café yemení frente a otros orígenes, logrando una exactitud, sensibilidad y especificidad superiores al 98 % al utilizar bases de datos equilibradas. | (Santos-Rivera et al., 2024) |
| MicroNIR + quimiometría | Café robusta, maíz, cáscaras y palitos | Se evaluó el potencial del MicroNIR en el control de calidad del café arábica. MicroNIR fue combinada con la calibración multivariante por mínimos cuadrados parciales (PLS) y análisis de componentes principales (PCA) para analizar adulteraciones intencionales de 125 mezclas, a diferentes concentraciones (1 y el 100 % p/p) de los adulterantes: maíz y cáscaras/palillos y café robusta, incluyendo muestras comerciales. La metodología demostró eficiencia y capacidad para la predicción de adulteraciones con niveles mínimos de cuantificación (5-8 % p/p). | (Correia et al., 2018) |
| UV-Vis y NIR | Mezcla de especies de arábica y robusta | La determinación basada en espectroscopía UV-Vis de dos compuestos, la cafeína y el ácido clorogénico, alcanzó una precisión de clasificación ligeramente superior frente a la espectroscopía NIR y LDA. Sin embargo, la velocidad, la no destructividad y la baja participación de mano de obra de la espectroscopía NIR, la convierte en una técnica superior para la discriminación de especies <i>in situ</i> . Para futuras investigaciones deberían incluirse muestras de diferentes especies y variedades de diferentes regiones productoras de café para evaluar la solidez de la discriminación de especies basada en NIR. | (Adnan et al., 2020) |
| Especroscopías sincrónicas de fluorescencia y UV-Vis + quimiometría | Mezcla de especies | Los resultados obtenidos revelan que las espectroscopías de fluorescencia y UV-Vis se complementan para la discriminación de café arábica y robusta comerciales. | (Dankowska et al., 2017) |
| Especroscopía híbrida Raman + LIBS | Mezclas de variedades de café | Se evaluaron 7 marcas comerciales de café arábica. La combinación de un sistema híbrido Raman/LIBS compacto mejoró la precisión de la clasificación en aproximadamente un 10 % en comparación con el análisis de los espectros de los métodos individuales. Se espera que la combinación de las técnicas sea utilizada para la autenticación de alimentos. | (Shin et al., 2023) |
| LIBS | Origen y trazabilidad del café | El sistema LIBS proporciona información rápida, precisa y no destructiva sobre la composición química de los granos de café y permite la trazabilidad de este producto. | (Wu et al., 2023) |
| FRX e ICP | Distintos orígenes | El estudio evaluó los multielementos mediante técnicas basadas en plasma acoplado inductivamente (ICP) y especroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX), y se determinaron $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Los elementos múltiples basados en FRX, con y sin $\delta^{13}\text{C}$, parecieron ser los más eficaces para discriminar el origen geográfico del café, dando una exactitud de clasificación del 89 y 86 %, respectivamente. Los resultados sugieren que el enfoque de elementos múltiples basado en FRX puede ser un método para autenticar o determinar el origen geográfico del café etíope y también puede aplicarse para ayudar a combatir las actividades fraudulentas en el mercado del café. | (Worku et al., 2019) |

Continua en la siguiente página

Tabla 4. Principales metodologías reportadas para la diferenciación entre variedades de café y regiones de producción

| Técnica | Adulteración | Hallazgos | Referencia |
|--|------------------------------|---|--------------------------|
| LF-RMN ^{1H} | Mezclas de robusta y arábica | Los resultados mostraron que el índice de hidrógeno relativo es un parámetro útil para ser utilizado en análisis cuantitativo de los contenidos de cada variedad de café (robusta y arábica) presente en las mezclas. Se destaca el potencial de aplicabilidad de la relaxometría LF-RMN ^{1H} como herramienta útil en el control de la calidad e identificación de productos relacionados con la adulteración del café comercial. | (Muniz et al., 2023) |
| RMN ^{1H} | Mezclas de café | Este estudio proporciona una determinación cuantitativa de 16-O- metilcafestol (16-OMC) esterificado directamente en extractos de café mediante RMN ^{1H} de alta resolución. El límite de detección y el límite de cuantificación fueron 5 y 20 mg/kg, respectivamente, los cuales fueron adecuados para detectar la presencia de robusta en porcentajes inferiores al 0.9 % en muestras comerciales. | (Schievano et al., 2014) |
| RMN ^{1H} | Distintos orígenes | Tras dos años de recopilación de espectros, se determinó que la discriminación de los cafés comerciales de Colombia se basa en gran medida en los ácidos grasos, el acetato y la cafeína. Además, se demostró que se pueden realizar predicciones muy prometedoras de forma totalmente automática utilizando un disolvente no deuterado para la autenticación del origen del café. | (Arana et al., 2015) |
| RMN ^{1H} + quimiometría | Mezclas de robusta y arábica | Se desarrolló una metodología cuantitativa de RMN ^{1H} adecuada para autenticar el café 100 % robusta y 100 % arábica, y predecir el % de robusta en las mezclas comerciales. Los resultados sugieren que el análisis estadístico multivariante podría discriminar aún más las mezclas en las muestras de café basándose en su perfil químico. | (Burton et al., 2020) |
| RMN ^{1H} y C ¹³ en estado sólido | Mezclas de robusta y arábica | Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de la espectroscopía de RMN en estado sólido para examinar las movilidades e interacciones moleculares en el control de calidad de los productos relacionados con el café, lo que permite distinguir entre distintas variedades en muestras comerciales. | (Freitas et al., 2023) |
| SNP y pirosecuenciación | Mezclas de robusta y arábica | El análisis basado en la extensión de cebador de base única (SNaPshot) exhibió el mejor límite de detección, mientras que la pirosecuenciación reveló la mejor linealidad para muestras comerciales de granos. | (Spaniolas et al., 2014) |

FRX: espectrometría de fluorescencia de rayos X; GC-MS: cromatografía de gases-espectrometría de masas; ICP: plasma acoplado inductivamente; IR: espectroscopía infrarroja; LC-HRMS: cromatografía líquida-espectrometría de masas de alta resolución; UHPLC-CAD: cromatografía líquida de ultra alto rendimiento-detector de aerosoles cargados; LF-RMN ^{1H}: resonancia magnética nuclear de campo bajo; LIBS: espectroscopía de descomposición inducida por láser; MicroNIR: espectrómetro de la región del infrarrojo cercano; MS: espectrometría de masas; NIR: infrarrojo cercano; RMN ^{1H} y C¹³: resonancia magnética nuclear de protón y de carbono; RMN ^{1H}: resonancia magnética nuclear de protones; SNP: polimorfismo de nucleótido único; UHPLC-(Q)ToF MS: cromatografía líquida de ultra alta resolución acoplada a un espectrómetro de masas cuadrupolar híbrido de tiempo de vuelo; UHPLC-FLD: cromatografía líquida de ultra alto rendimiento-detector de fluorescencia; UV-Vis: ultravioleta-visible. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Reporte de metodologías para la detección de adulterantes y contaminantes potencialmente tóxicos

| Técnica | Adulteración | Hallazgos | Referencia |
|-------------------------|---|--|---|
| FTIR-ATR + quimiometría | Sibutramina | Los resultados del estudio demostraron que el método, a través del uso de la técnica FTIR-ATR, combinada con la quimiometría, funciona exitosamente sin ninguna predicción falsa cuando la adulteración intencional de sibutramina se aplica entre 0.375 y 12 mg en un total de 1.75 g de té verde, café verde y té de mezclas de hierbas. | (Cebi et al., 2017) |
| LC-MS/MS | Acrilamida | LC-MS/MS es un método validado, confiable y con alta precisión para identificar acrilamida en muestras comerciales de café molido e instantáneo. | (Bebius et al., 2024; Desmarchelier et al., 2022) |
| LC-MS/MS | Toxinas de alternaria: altenueno, alternariol, monometiléster de alternariol, tentoxina y ácido tenuazónico | Se analizaron un total de 78 muestras de café verde recolectadas en 21 países productores y se demostró que el café es una fuente insignificante de exposición a este tipo de toxinas. El método posee un amplio campo de aplicación, rendimientos adecuados de muestras y alta sensibilidad. | (Mujahid et al., 2020) |

FTIR-ATR: infrarrojo por transformada de Fourier-Reflectancia total atenuada; LC-MS/MS: cromatografía líquida-espectrometría de masas en tandem. Fuente: elaboración propia.

adaptadas a las particularidades de cada país. Sin embargo, persiste una brecha normativa entre los países productores y consumidores, lo que subraya la necesidad de la colaboración internacional entre gobiernos, industrias y organismos técnicos para garantizar que la adulteración del café no se convierta en un riesgo para la salud pública (Haji et al., 2023).

Agradecimientos

A José Luis López Pérez (Universidad de Salamanca, España) por proporcionar apoyo bibliográfico para la elaboración del presente manuscrito. A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FID 022-22, SNI de EGDL y AVR, beca KAG para el programa de Maestría en Programa de Maestría en Ciencias Químicas con énfasis en Inocuidad alimentaria de UNACHI.). A la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá (CUFI-2023-CS-P-008).

Referencias

- Administración de Alimentos y Medicamentos [FDA]. (2017). Manual de procedimientos macroanalíticos (MPM): V-1. Bebidas y materiales para bebidas. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/mpm-v-1-beverages-and-beverage-materials>
- Adnan, A., Naumann, M., Mörlein, D., & Pawelzik, E. (2020). Reliable Discrimination of Green Coffee Beans Species : A comparison of UV-Vis-Based Determination of Caffeine and Chlorogenic Acid with Non-Targeted Near-Infrared Spectroscopy. *Foods*, 9(788), 1-14. <https://doi.org/10.3390/foods9060788>
- Arana, V. A., Medina, J., Alarcon, R., Moreno, E., Heintz, L., Schäfer, H., & Wist, J. (2015). Coffee 's country of origin determined by NMR : The Colombian case. *Food Chemistry*, 175, 500-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.160>
- Arrieta, A. A., Arrieta, P. L., & Mendoza, J. M. (2019). Analysis of coffee adulterated with roasted corn and roasted soybean using voltametric electronic tongue. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, 18(1), 35-41. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17306/J.AFS.2019.0619>
- Asensio, E., Peiro, T., & Nerín, C. (2019). Determination the set-off migration of ink in cardboard-cups used in coffee vending machines. *Food and Chemical Toxicology*, 130, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.05.022>
- Bebius, A., Reding, F., Theurillat, V., Valérie, L., Konings, E., Delatour, T., & Desmarchelier, A. (2024). Determination of Acrylamide in Coffee, Cereals, Baby Food, Cocoa, Dry Pet Food, Potato Products, Vegetable Crisps, Biscuits, Tea, Nuts, and Spices by LC-MS/MS in a Single-Laboratory Validation: First Action 2023.01. *Journal of AOAC International*, 107(3), 453-463. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsa007>
- Bertholee, D., ter Horst, P., Wieringa, A., & Smit, J. (2013). Life-threatening psychosis caused by using sibutramine-contaminated weight-loss coffee. *Nederlands Tijdschrift Voor Geneeskunde*, 157(51), A6676.
- Boadu, V. G.; Teye, E.; Amuah, C. y Sam-Amoah, L. K. (2022). Rapid authentication of coffee bean varieties of different forms by using a pocket-sized spectrometer and multivariate data modelling. *Analytical Methods*, 46. <https://doi.org/10.1039/d2ay01480g>
- Brondi, A. M.; Torres, C.; Garcia, J. S. y Trevisan, M. G. (2017). Differential Scanning Calorimetry and Infrared Spectroscopy Combined with Chemometric Analysis to the Determination of Coffee Adulteration by Corn. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 28(7), 1308-1314. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20160296>
- Burns, D. T. y Walker, M. J. (2020). Critical Review of Analytical and Bioanalytical Verification of the Authenticity of Coffee. *AOAC International*, 103(2), 283-294.
- Burton, I. W.; Martínez, C. F.; Ragupathy, S.; Arunachalam, T.; Newmaster, S. y Berrué, F. (2020). Quantitative NMR methodology for the authentication of roasted coffee and prediction of blends. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(49), 14643-14651. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06239>
- Cai, T.; Ting, H. y Jin-lan, Z. (2016). Novel identification strategy for ground coffee adulteration based on UPLC - HRMS oligosaccharide profiling. *Food Chemistry*, 190, 1046-1049. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.084>
- Cebi, N.; Yilmaz, M. T. y Sagdic, O. (2017). A rapid ATR-FTIR spectroscopic method for detection of sibutramine adulteration in tea and coffee based on hierarchical cluster. *Food Chemistry*, 229, 517-526. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.072>
- Cestari, A. (2021). Development of a fast and simple method to identify pure Arabica coffee and blended coffee by Infrared Spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 3645-3654. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05176-4>
- Cheah, W. L. y Fang, M. (2020). HPLC-based chemometric analysis for coffee adulteration. *Foods*, 9(7), 880. <https://doi.org/10.3390/foods9070880>
- Chen, Y.; Gao, B. y Lu, W. (2023). Recent research advancements of coffee quality detection : targeted analyses vs . nontargeted fingerprinting and related issues. *Journal of Food Quality*, 2023(1). <https://doi.org/10.1155/2023/6156247>
- Correia, R. M.; Tosato, F.; Domingos, E.; Rodrigues, R.; Aquino, L. F.; Filgueiras, P.; Lacerda, V. y Romão, W. (2018). Portable near infrared spectroscopy applied to quality control of Brazilian coffee. *Talanta*, 176, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.009>
- Daniel, D.; Silva Lopes, F. ; Bezerra dos Santos, V. y Lucio do Lago, C. (2018). Detection of coffee adulteration with soybean and corn by capillary electrophoresis-tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, 243, 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.140>
- Dankowska, A.; Domagała, A. y Kowalewski, W. (2017). Quantification of Coffea arabica and Coffea canephora var. robusta concentration in blends by means of synchronous fluorescence and UV-Vis spectroscopies. *Talanta*, 172, 215-220. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.05.036>
- De Araújo, T. K.; Nóbrega, R.; Fernandes, D. D.; De Araújo, M. C. ; Diniz, P. H. y Da Silva, E. (2021). Non-destructive authentication of Gourmet ground roasted coffees using NIR spectroscopy and digital images. *Food Chemistry*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130452>
- De Carvalho Couto, C., Davy William, H. C., Edna Maria, M. O., Otniel, F.-S., & Susana, C. (2024). SPME-GC-MS untargeted metabolomics approach to identify potential volatile compounds as markers for fraud detection in roasted and ground coffee. *Food Chemistry*, 446(138862). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138862>
- De Carvalho Couto, C.; Freitas-Silva, O.; Morais Oliveira, E. M.; Sousa, C. y Casal, S. (2022). Near-infrared spectroscopy applied to the detection of multiple adulterants in roasted and ground arabica coffee. *Foods*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/foods11010061>

- De Carvalho Couto, C.; Hidalgo Chávez, D. W.; Morais Oliveira, E. M.; Freitas-Silva, O. y Casal, S. (2024). SPME-GC-MS untargeted metabolomics approach to identify potential volatile compounds as markers for fraud detection in roasted and ground coffee. *Food Chemistry*, 446, 138862. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138862>
- De Morais, T.; Rodrigues, D.; De Carvalho Polari Souto, U. T., y Lemos, S. G. (2019). A simple voltammetric electronic tongue for the analysis of coffee adulterations. *Food Chemistry*, 273, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.136>
- De Moura Ribeiro, M. V.; Boralle, N.; Redigolo Pezza, H.; Pezza, L. y Toci, A. T. (2017). Authenticity of Roasted Coffee using 1 H NMR Spectroscopy. *Journal of Food Composition and Analysis*, 57, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.12.004>
- Desmarchelier, A.; Bebius, A.; Reding, F.; Griffin, A.; Ahijado, M.; Beasley, J.; Clauzier, E. y Delatour, T. (2022). Towards a consensus LC-MS/MS method for the determination of acrylamide in food that prevents overestimation due to interferences. *Food Additives & Contaminants*, 39(4), 653-665. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.2022773>
- Dharmawan, A.; Masithoh, R. y Zuhrotul Amanah, H. (2023). Development of PCA-MLP model based on visible and shortwave near infrared spectroscopy for authenticating arabica coffee origins. *Foods*, 12(11), 2112. <https://doi.org/10.3390/foods12112112>
- Domingues, D. S.; Pauli, E. D.; de Abreu, J. E.; Massura, F. W.; Cristiano, V.; Santos, M. J. y Nixdorf, S. L. (2014). Detection of roasted and ground coffee adulteration by HPLC by amperometric and by post-column derivatization UV - Vis detection. *Food Chemistry*, 146, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.066>
- Farag, M. A.; Zayed, A.; Sallam, I. E.; Abdelwareth, A. y Wessjohann, L. A. (2022). Metabolomics-based approach for coffee beverage improvement in the context of processing, brewing methods, and quality attributes. *Foods*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/foods11060864>
- Ferrari, R. (2015). Writing narrative style literature reviews. *Medical Writing*, 24(4). <https://doi.org/10.1179/2047480615Z.000000000329>
- Ferreira, T.; Farah, A.; Oliveira, T. C.; Lima, I. S.; Vitório, F. y Oliveira, E. (2016). Using real-time PCR as a tool for monitoring the authenticity of commercial coffees. *Food Chemistry*, 199, 433-438. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.045>
- Ferreira, T.; Galluzzi, L.; De Paulis, T. y Farah, A. (2021). Three centuries on the science of coffee authenticity control. *Food Research International*, 149, 110690. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110690>
- Flores-Valdez, M.; Meza-Márquez, O. G.; Osorio-Revilla, G. y Gallardo-Velázquez, T. (2020). Identification and quantification of adulterants in coffee (*Coffea arabica* L.) using FT-MIR spectroscopy coupled with chemometrics. *Foods*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/foods9070851>
- Freitas, J.; Ejaz, M.; Toci, A.; Romão, W. y Khimyak, Y. (2023). Solid-state NMR spectroscopy of roasted and ground coffee samples : Evidences for phase heterogeneity and prospects of applications in food screening. *Food Chemistry*, 409, 135317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135317>
- Haji, A.; Desalegn, K. y Hassen, H. (2023). Selected food items adulteration, their impacts on public health, and detection methods: A review. *Food Science and Nutrition*, 11(12), 7534-7545. <https://doi.org/10.1002/fsn.3.3732>
- Hoyos, D.; Gil-solsona, R.; Peñuela, G.; Sancho, J. V. y Hernández, F. (2018). Assessment of protected designation of origin for Colombian coffees based on HRMS-based metabolomics. *Food Chemistry*, 250, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.038>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2007). Resolución 3626 Por la cual se establece el registro ante el ICA, de productores-comercializadores, y comercializadores de Colinos de Café, en el territorio nacional. 2007(46).
- Ismaiel, L.; Fanesi, B.; Kuhalskaya, A.; Barp, L.; Moret, S.; Pacetti, D. y Lucci, P. (2023). The determination of triacylglycerols and tocopherols using UHPLC-CAD/FLD methods for assessing the authenticity of coffee beans. *Foods*, 12(23), 4197. <https://doi.org/10.3390/foods12234197>
- Jumhawan, U.; Putri, S. P.; Yusianto; Bamba, T. y Fukusaki, E. (2016). Quantification of coffee blends for authentication of Asian palm civet coffee (Kopi Luwak) via metabolomics: A proof of concept. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 122(1), 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.12.008>
- Kamiloglu, S. (2019). Authenticity and traceability in beverages. *Food Chemistry*, 277, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.091>
- Klikarová, J. y Česlová, L. (2022). Targeted and non-targeted HPLC analysis of coffee-based products as effective tools for evaluating the coffee authenticity. *Molecules*, 27(721) 7419. <https://doi.org/10.3390/molecules27217419>
- Markos, M.; Tola, Y.; Kebede, B. y Ogah, O. (2023). Metabolomics: A suitable foodomics approach to the geographical origin traceability of Ethiopian Arabica specialty coffees. *Food Science and Nutrition*, 11(8), 4419-4431. <https://doi.org/10.1002/fsn.3.3434>
- Martins, V. D. C.; Luiz, R.; Godoy, D. O.; Cristina, A.; Senna, M.; Cristina, M.; Araujo, P. De; Borguini, R. G.; Cristina, E.; Braga, D. O.; Pacheco, S. y Mattos, S. De (2018). Fraud investigation in commercial coffee by chromatography. *Food Quality and Safety, June*, 1-13. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy017>
- Mendes, E. y Duarte, N. (2021). Mid-Infrared spectroscopy as a valuable tool to tackle food. *Foods*, 10(2), 477. <https://doi.org/10.3390/foods10020477>
- Mihailova, A.; Liebisch, B.; Islam, M.; Carstensen, J. M.; Cannavan, A. y Kelly, S. (2022). The use of multispectral imaging for the discrimination of Arabica and Robusta coffee beans. *Food Chemistry: X*, 14, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchx.2022.100325>
- Milani, M. I.; Rossini, E. L.; Catelani, T. A.; Pezza, L.; Toci, A. T. y Pezza, H. R. (2020). Authentication of roasted and ground coffee samples containing multiple adulterants using NMR and a chemometric approach. *Food Control*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107104>
- Mujahid, C.; Savoy, M.; Baslé, Q.; Woo, P. M.; Chin, E.; Mottier, P. y Bessaire, T. (2020). Levels of Alternaria toxins in selected food commodities including green coffee. *Toxins*, 12(9), 1-17. <https://doi.org/10.3390/toxins12090595>
- Muniz, R.; Gonzalez, J. L.; Toci, A. y Freitas, J. (2023). Using ¹H low-field NMR relaxometry to detect the amounts of Robusta and Arabica varieties in coffee blends. *Food Research International*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113610>
- Núñez, N.; Collado, X.; Martínez, C.; Saurina, J. y Núñez, O. (2020). Authentication of the origin, variety and roasting degree of coffee samples by non-targeted HPLC-UV fingerprinting and chemometrics. application to the detection and quantitation of adulterated coffee samples. *Foods*, 9(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/foods9030378>

- Núñez, N.; Saurina, J. y Núñez, O. (2024). Liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry (LC-HRMS) fingerprinting and chemometrics for coffee classification and authentication. *Molecules*, 29(1). <https://doi.org/10.3390/molecules29010232>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (n.d.). Historia. Codex alimentarius. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/about-codex-history/en/>
- Organización Internacional del Café [ICO]. (2008). International Coffee Agreement 2007. <https://www.ico.org/documents/ed2040e.pdf>
- Pauli, E. D.; Barbieri, F.; Garcia, P.; Madeira, T.; Acquaro Junior, V.; Scarminio, I. S.; Alberto, C. y Nixdorf, S. L. (2014). Detection of ground roasted coffee adulteration with roasted soybean and wheat. *Food Research International*, 61, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.032>
- Perez, M.; Domínguez-López, I.; López-Yerena, A.; y Vallverdú, A. (2023). Current strategies to guarantee the authenticity of coffee. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(4), 539-554. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1951651>
- Pradana-López, S.; Pérez-Calabuig, A. M.; Cancilla, J. C.; Lozano, M. A.; Rodrigo, C.; Mena, M. L. y Torrecilla, J. (2021). Deep transfer learning to verify quality and safety of ground coffee. *Food Control*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107801>
- Reglamento CEE N° 2081/92. (1992). Relativo a la protección de las indicaciones geográficas y de las denominaciones de origen de los productos agrícolas y alimenticios. 4, 1-8.
- Reis, N.; Franca, A. S. y Oliveira, L. S. (2016). Concomitant use of fourier transform infrared attenuated total reflectance spectroscopy and chemometrics for quantification of multiple adulterants in roasted and ground coffee. 2016(1). <https://doi.org/10.1155/2016/4974173>
- República de Panamá. (2022). Ley N° 326 (De lunes 05 de septiembre de 2022) que establece medidas para incentivar la producción, procesamiento y desarrollo del café. Gaceta Oficial de la República de Panamá, N.º29615B. 326 (29615). <https://bit.ly/4j4HOLO>
- Roldán-Pérez, A. (2008). The japanese coffee market: opportunities for developing countries (with emphasis on Colombia). Editorial EAFIT.
- Santos-Rivera, M.; Montagnon, C. y Sheibani, F. (2024). Identifying the origin of Yemeni green coffee beans using near infrared spectroscopy: A promising tool for traceability and sustainability. *Scientific Reports*, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64074-9>
- Schiavano, E.; Finotello, C.; De Angelis, E.; Mammi, S. y Navarini, L. (2014). Rapid authentication of coffee blends and quantification of 16-O-methylcafestol in roasted coffee beans by nuclear magnetic resonance. *Agricultural and Food Chemistry*, 62(51), 12309-12314. <https://doi.org/10.1021/jf505013d>
- Seto, Y.; Kataoka, M.; Tsuge, K. y Takaesu, H. (2000). Pitfalls in the Toxicological Analysis of an Isobutyl Nitrite-Adulterated Coffee Drink. *Analytical Chemistry*, 72(21), 5187-5192. <https://doi.org/10.1021/ac000509c>
- Sezer, B.; Apaydin, H.; Bilge, G. y Boyaci, I. (2018). Coffee arabica adulteration: Detection of wheat, corn and chickpea. *Food Chemistry*, 264, 142-148. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.037>
- Shin, S.; Doh, I.; Okeyo, K.; Bae, E.; Robinson, J. P. y Rajwa, B. (2023). Hybrid Raman and laser-induced breakdown spectroscopy for food authentication applications. *Molecules*, 28(16). <https://doi.org/10.3390/molecules28166087>
- Song, H. Y.; Jang, H. W.; Debnath, T. y Lee K. G. (2019). Analytical method to detect adulteration of ground roasted coffee. *International Journal of Food Science and Technology*, 1-7. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13942>
- Spaniolas, S.; Bazakos, C.; Tucker, G.; y Bennet, M. (2014). Comparison of SNP-based detection assays for food analysis: Coffee authentication. *Food Composition and Additives*, 97(15), 1114-1120. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.13-237>
- Tibola, C. S.; Da Silva, S.; Dossa, A. A. y Patrício, D. I. (2018). Economically motivated food fraud and adulteration in Brazil: incidents and alternatives to minimize occurrence. *Journal of Food Science*, 83(8), 2028-2038. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14279>
- Toci, A. T.; Farah, A.; Pezza, H. R. y Pezza, L. (2016). Coffee adulteration: more than two decades of research. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 46(2), 83-92. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.966185>
- Toledo, B. R.; Hantao, L.; Ho, T. D.; Augusto, F. y Anderson, J. L. (2014). A chemometric approach toward the detection and quantification of coffee adulteration by solid-phase microextraction using polymeric ionic liquid sorbent coatings. *Journal of Chromatography A*, 1345, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.04.035>
- U.S. Department of Agriculture. (2004). Commercial item Description: Coffee. https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/CID_Coffee.pdf
- Vega, A.; De León, J. A. y Reyes, S. M. (2017). Determinación del contenido de polifenoles totales, flavonoides y actividad antioxidante de 34 cafés comerciales de Panamá. *Información Tecnológica*, 28(4), 29-38. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000400005>
- Wang, X.; Lim, L. T.; y Fu, Y. (2020). Review of analytical methods to detect adulteration in coffee. *Journal of AOAC International*, 103(2), 295-305. <https://doi.org/10.1093/JAOCINT/QSZ019>
- Winkler-Moser, J. K.; Singh, M.; Rennick, K.; Bakota, E.; Jham, G.; Liu, S. y Vaughn, S. (2015). Detection of corn adulteration in Brazilian coffee (*Coffea arabica*) by tocopherol profiling and near-infrared (NIR) spectroscopy. *Agricultural and Food Chemistry*, 63(49), 10662-10668. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04777>
- Worku, M.; Upadhyay, H.; Latruwe, K.; Taylor, A.; Blake, W.; Vanhaecke, F.; Duchateau, L. y Boeckx, P. (2019). Differentiating the geographical origin of Ethiopian coffee using XRF- and ICP-based multi-element and stable isotope profiling. *Food Chemistry*, 290, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.135>
- Wu, X.; Shin, S.; Gondhalekar, C.; Patsekin, V.; Bae, E.; Robinson, J. P. y Rajwa, B. (2023). Rapid Food Authentication Using a Portable Laser-Induced Breakdown Spectroscopy System. *Foods*, 12(2), 402. <https://doi.org/10.3390/foods12020402>
- Xie, J. y Tan, J. (2022). Front-face synchronous fluorescence spectroscopy: A rapid and non-destructive authentication method for Arabica coffee adulterated with maize and soybean flours. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 17(3), 209-219. <https://doi.org/10.1007/s00003-022-01396-8>
- Yang, H.; Ai, J.; Zhu, Y.; Shi, Q. y Yu, Q. (2024). Rapid classification of coffee origin by combining mass spectrometry analysis of coffee aroma with deep learning. *Food Chemistry*, 446, 138811. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138811>
- Yulia, M. y Suhandy, D. (2021). Quantification of corn adulteration in wet and dry-processed peaberry ground roasted coffees by UV-Vis spectroscopy and chemometrics. *Molecules*, 26(20), 6091. <https://doi.org/10.3390/molecules26206091>