

**Revisión Sistemática: Composición Metabolómica del Café: Un Análisis Comparativo entre
Variedades Convencional y Orgánica**

Diana Solangie Martin Sarmiento

Asesor

William Javier Cuervo Bejarano

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas ECAPMA

Programa de Agronomía

2025

Resumen

La composición metabolómica del café ha adquirido una relevancia creciente en la investigación científica debido a su estrecha relación con la calidad sensorial, el valor nutricional, las propiedades funcionales y la sostenibilidad de los sistemas productivos. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una revisión sistemática de la literatura científica para analizar y comparar la composición metabolómica del café cultivado bajo sistemas orgánicos y convencionales. La investigación se estructuró siguiendo las directrices PRISMA 2020 y se apoyó en el modelo PECO para formular la pregunta de investigación. Se realizó una búsqueda exhaustiva en las bases de datos Scopus y Web of Science, abarcando estudios publicados entre 2010 y 2024, que emplearon técnicas analíticas avanzadas como LC-MS, GC-MS y RMN. Los resultados evidencian que el sistema de cultivo influye de manera significativa en el perfil de metabolitos del grano de café, especialmente en compuestos bioactivos como los ácidos clorogénicos, la cafeína y otros antioxidantes. Asimismo, se observa que el café orgánico concentra una mayor diversidad temática en la literatura científica, asociada a enfoques de sostenibilidad, salud y certificación, mientras que el café convencional presenta un abordaje más limitado, centrado principalmente en la calidad química básica. En conjunto, los hallazgos permiten concluir que la metabolómica constituye una herramienta clave para comprender las diferencias entre ambos sistemas de producción y aportar evidencia científica para la toma de decisiones en los ámbitos productivo, comercial y de consumo responsable.

Palabras clave: café; metabolómica; orgánico; convencional; sostenibilidad

Abstract

The metabolomic composition of coffee has gained increasing relevance in scientific research due to its close relationship with sensory quality, nutritional value, functional properties, and the sustainability of production systems. In this context, the aim of this study is to conduct a systematic review of the scientific literature to analyze and compare the metabolomic composition of coffee cultivated under organic and conventional systems. The research was structured according to PRISMA 2020 guidelines and supported by the PECO model to formulate the research question. A comprehensive search was carried out in the Scopus and Web of Science databases, covering studies published between 2010 and 2024 that applied advanced analytical techniques such as LC-MS, GC-MS, and NMR. The results indicate that the cultivation system significantly influences the metabolite profile of coffee beans, particularly bioactive compounds such as chlorogenic acids, caffeine, and other antioxidants. In addition, the findings show that organic coffee is associated with greater thematic diversity in the scientific literature, with a strong focus on sustainability, health, and certification, whereas conventional coffee research is more limited and mainly centered on basic chemical quality. Overall, the evidence supports the conclusion that metabolomics is a key tool for understanding the differences between organic and conventional coffee production systems and for providing scientific support for decision-making in productive, commercial, and responsible consumption contexts.

Keywords: coffee; metabolomics; organic; conventional; sustainability

Tabla de Contenido

Introducción	8
Justificación	10
Objetivos.....	12
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos	12
Planteamiento del Problema	13
Marco Teorico.....	15
Alcance de la metabolómica en el estudio del café	15
Diferencias entre café orgánico y convencional en composición química.....	15
Variaciones en compuestos fenólicos y alcaloides	15
Relación entre origen geográfico variedades y metabolitos	16
Procesos postcosecha y su efecto metabolómico	16
Actividad antioxidante y potencial funcional	17
Sustentabilidad ambiental y huella de cultivo	17
Autenticación y control de calidad mediante metabolómica.....	17
Metodología	18
Tipo de estudio	18
Formulación de la pregunta de investigación (modelo PECO).....	18
Fuentes de información y bases de datos.....	19
Estrategia de búsqueda	20
Criterios de inclusión y exclusión	20
Proceso de selección de estudios.....	21

Extracción de datos.....	21
Resultados Y Discusión	23
Síntesis y análisis de resultados.....	23
Conclusiones.....	40
Referencias Bibliográficas	42

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Estructuración del modelo PECO del negocio</i>	19
--	----

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de flujo del estudio PRISMA desde la investigación inicial hasta la selección final de los artículos que se incluirán en esta revisión sistemática del 2018-2024.</i>	21
Figura 2 <i>Fuentes más relevantes Fuente: bibliometrix, 2025</i>	23
Figura 3 <i>Países de Afiliación del Autor (AU_CO) - Autores Individuales (AU) -Palabras Clave de la Investigación (KW_Merged bibliometrix, 2025</i>	25
Figura 4 <i>Países de autor correspondiente bibliometrix, 2025.....</i>	27
Figura 5 <i>Producción científica del país bibliometrix, 2025</i>	29
Figura 6 <i>Nube de palabras bibliometrix, 2025</i>	31
Figura 7 <i>Temas de tendencia bibliometrix, 2025.....</i>	34
Figura 8 <i>Palabras claves bibliometrix, 2025.....</i>	37

Introducción

El café es una de las bebidas de mayor consumo a nivel mundial y es un producto agrícola representante de la alta demanda de un producto con una gran relevancia económica, social y cultural dentro de la cultura e historia de diferentes países, principalmente en América Latina, África y Asia (Campuzano-Duque et al., 2021; Watson & Achinelli, 2008), donde el valor dado a esta misma cadena productiva, no solo por el consumo que se realiza sobre el mismo producto, sino debido a la estructuración misma que se ha realizado a la producción del mismo, donde se generan diferentes formas de beneficio y contribución a diferentes actores y grupos poblacionales (Ahmed et al., 2021a).

En la cadena productiva del café se ha generado una gran relevancia sobre la calidad misma del producto, principalmente porque esa misma calidad es uno de los factores que más influyen sobre la aceptación del producto en los nichos de mercado (Márquez et al., 2020). Por lo tanto, se debe resaltar que la calidad del café se encuentra determinada por la composición y estructura misma de los granos de café, los cuales tienden a mantener una composición algo variante debido a la forma como se desarrolla su proceso de cultivo, cosecha y producción (Mazzafera, 1999).

En este punto, se debe tomar en cuenta que la composición metabolómica del grano de café, o sea, el perfil de componentes bioactivos y antioxidantes que contiene ha ganado un creciente interés en la ciencia, por lo que no solo estos metabolitos aportan a las características organolépticas del producto, sino que también tienen consecuencias funcionales y nutricionales para la salud de las personas. Es decir, que los factores tales como la modalidad de cultivo (convencional u orgánico), las condiciones del terreno, la altura, la gestión agronómica y el tratamiento postcosecha tienen un impacto considerable en la composición química del grano,

provocando fluctuaciones en la cantidad de compuestos como los ácidos clorogénicos, la cafeína, los flavonoides y otros antioxidantes naturales (Josué et al., 2024).

En este contexto, el propósito principal de esta monografía es llevar a cabo una revisión sistemática de los estudios científicos acerca de la composición metabolómica del café, contrastando las discrepancias presentes entre las variedades generadas bajo sistemas orgánicos y convencionales, por lo que este estudio tiene como objetivo consolidar el saber existente, detectar patrones coherentes y proporcionar recursos pertinentes para la toma de futuras decisiones de ser el caso, en los sectores científico, productivo y comercial. Finalmente, se debe resaltar que con el estudio se busca proporcionar un fundamento técnico que respalde la discusión acerca de la calidad total del café, teniendo en cuenta tanto sus características funcionales como su repercusión en el medio ambiente y la sociedad.

Justificación

Inicialmente, se debe tomar en cuenta que la producción y consumo de café constituyen un pilar socioeconómico de gran importancia para muchos países productores, en particular en América Latina (Alexis & gallego, 2021). En este escenario, el incremento en la demanda de productos agrícolas orgánicos genera cuestionamientos acerca de la calidad nutricional y funcional del café cultivado mediante sistemas de producción orgánica en comparación con el café tradicional, donde se indican que la implementación de prácticas sustentables puede tener un impacto considerable en la concentración de metabolitos secundarios, tales como los fenólicos y la cafeína, que definen en gran parte las características sensoriales y ventajosas para la salud del café (Ahmed et al., 2021a).

De acuerdo con (Rojas-Chacón et al., 2024), elementos como el tipo de fertilización, las técnicas de gestión del suelo y la regulación de plagas influyen en la producción de compuestos bioactivos, creando variados perfiles químicos que pueden afectar la calidad final del grano y la bebida. En este contexto, la organización de la información ayudará a detectar patrones consistentes, potenciales vacíos de investigación y áreas de prioridad para futuras investigaciones en el campo de la ciencia alimentaria y la agricultura sustentable.

Además, el incremento en el interés de los consumidores por productos que fusionan calidad organoléptica con ventajas para la salud demanda datos comprobados que apoyan la selección entre café orgánico y convencional, siendo así que, en este contexto, es crucial entender la composición de metabolitos como los ácidos clorogénicos y los antioxidantes, por su importancia nutricional y funcional. Finalmente, esta monografía aspira a contribuir a la bibliografía científica a través de un análisis meticuloso y organizado, que funcione como guía para productores, vendedores, investigadores y consumidores preocupados por la calidad total

del café, fomentando así decisiones más fundamentadas y prácticas de agricultura más sustentables que contribuyan a nivel socioeconómico y también a la garantía del producto para el cliente.

Objetivos

Objetivo General

Construir una revisión sistemática sobre la composición metabólica del café realizando una comparación entre las diferencias existentes entre variedades de cultivo convencional y orgánico en términos del perfil nutricional y bioactivo

Objetivos Específicos

Recopilar estudios disponibles sobre la composición metabólica del café en variedades convencionales y orgánicas, donde se incluya sus compuestos bioactivos, antioxidantes y nutrientes.

Comparar los diferentes hallazgos reportados sobre algunos compuestos metabólicos y que determinan la calidad de los granos de café.

Analizar los hallazgos reportados sobre los compuestos metabólicos que determinan la calidad sensorial de los granos de café bajo diferentes sistemas de cultivo

Planteamiento del Problema

El café es un producto con finalidad de uso agrícola, donde este mismo tiene una gran relevancia dentro del campo económico y social a nivel mundial, esto debido a que la cadena productiva del café involucra diferentes etapas y procesos que involucran una gran cantidad de actores y personas que resultan beneficiarias de su cultivo, cosecha, producción, industrialización y comercialización (Miranda et al., 2017). En este punto, se debe tomar en cuenta que el café es un producto el cual basa su consumo en la calidad de este, el cual puede generar sabor, olor y otras condiciones organolépticas dependiendo de su composición química fundamental (Miranda et al., 2017).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, dentro de la calidad del café, existen diferentes factores que generan influencia sobre esta misma, entre los cuales se encuentra el perfil metabólico, esto debido a la forma como influye sobre las propiedades funcionales del mismo, generando cambios sobre la capacidad antioxidante y la concentración de los compuestos bioactivos (Chekol et al., 2024). Adicionalmente, también el tipo de cultivo es de gran influencia sobre la calidad y composición química y metabólica del café, esto debido a que el método de cultivo puede conllevar al uso de diferentes formas de nutrición y apoyo al cultivo que pueden influir directamente sobre el café, principalmente dependiente de la forma como se nutre el cultivo (Cheng et al., 2016).

Así mismo, la creciente demanda de productos orgánicos, motivada por preocupaciones ambientales y de salud, ha impulsado el interés por conocer si el café orgánico ofrece ventajas reales desde una perspectiva nutricional y funcional (Rodríguez et al., 2021). Sin embargo, sin una consolidación crítica de la literatura científica, persiste la incertidumbre tanto en consumidores como en productores respecto a la conveniencia de invertir en prácticas de

agricultura orgánica, que suelen implicar mayores costos de producción y certificación (Chekol et al., 2024).

Finalmente, mediante el presente estudio, se busca responder a: ¿Cuáles son las diferencias en la composición metabolómica, específicamente en los perfiles de compuestos bioactivos y antioxidantes, entre las variedades de café cultivadas mediante sistemas convencionales y orgánicos según la evidencia científica disponible?

Marco Teórico

Alcance de la metabolómica en el estudio del café

La metabolómica permite analizar de manera simultánea centenas de metabolitos primarios y secundarios en el café, utilizando técnicas avanzadas como LC-MS y H-NMR, lo que facilita identificar patrones químicos relacionados con calidad, origen y tratamiento del grano. Un estudio de (Zhang et al., 2022) aplicó LC-MS para caracterizar 60 compuestos diferentes en granos de *Coffe arábica*, incluyendo ácidos clorogénicos, cafeína y flavonoides, demostrando que estas técnicas ofrecen una visión integral del perfil químico del café. Además, (Rossi, 2023) empleo metabolómico no dirigida para distinguir especies y terroir en café utilizando UHPLC-HRMS combinado con análisis multivariante.

Diferencias entre café orgánico y convencional en composición química

En primer lugar, se tiene que estudios han evidenciado que el sistema de cultivo (orgánico vs convencional) influye significativamente en el perfil metabolómico del café. Por ejemplo, Li et al., (2023) y Rocha et al. (2019) encontraron diferencias en niveles de compuestos fenólicos y minerales según el manejo agrícola. Adicionalmente, en el estudio de (Lucy et al., 2015) reportaron que los suelos de cafetales orgánicos presentaron mayor actividad microbiana y mejores características físicas, lo que puede impactar indirectamente en la calidad del fruto.

Variaciones en compuestos fenólicos y alcaloides

Los polifenoles, especialmente los ácidos clorogénicos, son reconocidos por su actividad antioxidante. Por otro lado, se sabe que (Velmourougane et al., 2017) analizaron cafés naturales vs lavados y encontraron diferencias significativas en los perfiles de clorogénicos, con beneficios funcionales potenciales. Por su parte, reportaron que los niveles de cafeína varían según la especie y origen, pero menos por el sistema de cultivo. Impacto del suelo y microbiota en café

orgánico

El manejo orgánico favorece la estructura del suelo y la biodiversidad microbiana. Siendo así, que (Velmourougane et al., 2017) informaron mayor carbono orgánico del suelo, respiración microbiana y macrofauna en sistemas orgánicos respecto a los convencionales. Esto puede modular la absorción de nutrientes y afectar indirectamente la síntesis de metabolitos en el grano, dado que el perfil químico del café está influenciado por condiciones edáficas y biológicas.

Relación entre origen geográfico variedades y metabolitos

El terroir y la especie de cafeto influyen tanto o más que el sistema de cultivo. Con lo anterior, se debe resaltar que (Chavarro Hurtado & Vargas, 2022) identificaron marcadores químicos que diferencian *Coffe arábica* de *C. canephora* mediante PCA y OPLS-DA. Así mismo, encontraron que la cafeína y otros alcaloides varían significativamente entre especies y regiones, lo que tiene implicaciones tanto sensoriales como funcionales.

Se han comparado distintas plataformas de espectrometría para evaluar su eficacia en metabolómica del café. Por lo tanto, se tiene que según (Madrid Gambín, 2017) compararon dos sistemas QTOF (ZenoTOF 7600 vs QTOF A), demostrando que el primero ofrece mayor cobertura de metabolitos y sensibilidad, agilizando el análisis en una sola inyección. Esta mejora técnica permite una caracterización más completa del perfil químico del café.

Procesos postcosecha y su efecto metabolómico

Los métodos de procesamiento (natural, lavados, fermentación) generan cambios importantes en el perfil de metabolitos. En este punto, se tiene que (Rojas-Chacón et al., 2024) demostraron que cafés naturales contienen más ácido clorogénico y mejores propiedades antidiabéticas en comparación con cafés lavados. Así mismo, análisis de fermentación con MS y

GC indican que la fermentación afecta la formación de ácidos orgánicos, alcoholes y ésteres volátiles, influyendo en aroma y sabor.

Actividad antioxidante y potencial funcional

Estudios sobre contenido de antioxidantes y actividad biológica reportan que cafés orgánicos y naturales pueden tener mayor actividad antioxidante total y propiedades funcionales asociadas. Por ejemplo, (Veracruzana & Xalapa, 2024) observaron que muestras orgánicas presentaban mayor capacidad antioxidante y menor contenido de residuos agrícolas. Además, (Zhang et al., 2022) sugirieron beneficios para salud metabólica por alto contenido de clorogénicos en cafés procesados naturalmente.

Sustentabilidad ambiental y huella de cultivo

Estudios de Análisis de Ciclo de Vida comparan el impacto ambiental entre café convencional y orgánico. (Cheng et al., 2016) reportan que el café orgánico reduce la huella de carbono en un 70 % respecto al convencional, debido a menor uso de fertilizantes sintéticos. Además, la biodiversidad de flora y fauna en sistemas orgánicos favorece la resiliencia ecológica y control natural de plagas.

Autenticación y control de calidad mediante metabolómica

La aplicación de metabolómica combinada con modelos de aprendizaje automático permite autenticar origen y prácticas de cultivo. Un estudio de (Ahmed et al., 2021a) utilizó metabolitos detectados mediante LC-MS y algoritmos predictivos para clasificar cafés por origen y sistema de producción. Estas técnicas contribuyen a combatir el fraude, garantizar la trazabilidad y mejorar la confianza del consumidor.

Metodología

Tipo de estudio

Esta investigación se desarrolla bajo el enfoque de una revisión sistemática de la literatura científica, complementada con análisis bibliométrico y con posibilidad de integrar un metaanálisis exploratorio. La revisión se estructura según las directrices PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que garantiza transparencia, exhaustividad y rigor metodológico en todas las fases del proceso (Yepes-Núñez et al., 2021). Esta elección metodológica responde a la necesidad de sintetizar críticamente la evidencia disponible sobre las diferencias en la composición metabólica del café cultivado mediante prácticas agrícolas orgánicas y convencionales.

Formulación de la pregunta de investigación (modelo PECO)

Para estructurar de manera clara y precisa el enfoque de esta revisión sistemática, se aplicó el modelo PECO, el cual resulta idóneo para estudios comparativos no clínicos, como los relacionados con prácticas agrícolas. Este modelo permite delimitar con rigurosidad los elementos clave de la investigación: la población objeto de estudio, la exposición a evaluar, el comparador de referencia y el resultado esperado. A continuación, se presenta la descomposición formal del modelo PECO utilizado en esta investigación:

Tabla 1

Estructuración del modelo PECO del negocio.

Elemento	Definición aplicada en esta investigación
P (Población)	Cultivos de café pertenecientes a las especies <i>Coffe arábica</i> y <i>Coffea canephora</i> , destinados al consumo humano, sin importar la región geográfica.
E (Exposición)	Manejo agrícola de tipo orgánico, caracterizado por el uso de técnicas agroecológicas, ausencia de agroquímicos sintéticos y certificación bajo normas ecológicas reconocidas.
C (Comparador)	Cultivo de café bajo sistema convencional, en el cual se aplican fertilizantes, pesticidas y herbicidas sintéticos, siguiendo prácticas de agricultura intensiva.
O (Resultado)	Composición metabolómica del grano de café, expresada en términos de diversidad y concentración de compuestos bioactivos como cafeína, ácidos clorogénicos, trigonelina, antioxidantes, entre otros.

Fuentes de información y bases de datos

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos científicas Scopus y Web of Science (WoS), por su alta cobertura internacional, rigurosidad en la indexación y compatibilidad con herramientas para revisión sistemática. Se incluyeron artículos publicados entre los años 2010 y 2024, sin restricción de idioma, siempre que cumplieran con los criterios metodológicos definidos. Estas fuentes proporcionaron acceso a estudios con análisis químico avanzado y comparaciones explícitas entre los dos tipos de manejo agrícola.

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se diseñó con base en términos clave relacionados con la temática, utilizando operadores booleanos para combinar conceptos. Los términos fueron seleccionados a partir de descriptores controlados y libres, considerando la especificidad del campo. Por ejemplo, se emplearon expresiones como: “coffee” AND “metabolomics” OR “chemical composition” AND “organic” OR “conventional”.

Estos términos se adaptaron a la sintaxis específica de cada base de datos y se aplicaron filtros para refinar los resultados y evitar duplicidades. Los metadatos de los artículos encontrados fueron exportados a un formato BibTeX, para procesarlos y analizarlos en el software estadístico R, utilizando el IDE RStudio (R Core Team, 2025) utilizando algunas librerías para limpiar y exportar (Aria & Cuccurullo, 2017; Robledo et al., 2025; Schaubberger & Walker, 2025; Wickham et al., 2019)

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios originales de tipo experimental o analítico que compararan cafés cultivados bajo sistemas orgánicos y convencionales, y que reportaran resultados sobre composición química, perfiles metabolómicos o contenido de compuestos bioactivos, utilizando técnicas como LC-MS, HPLC, GC-MS o espectroscopía NMR. También se aceptaron revisiones sistemáticas y metaanálisis previos, siempre que cumplieran con los estándares de calidad metodológica.

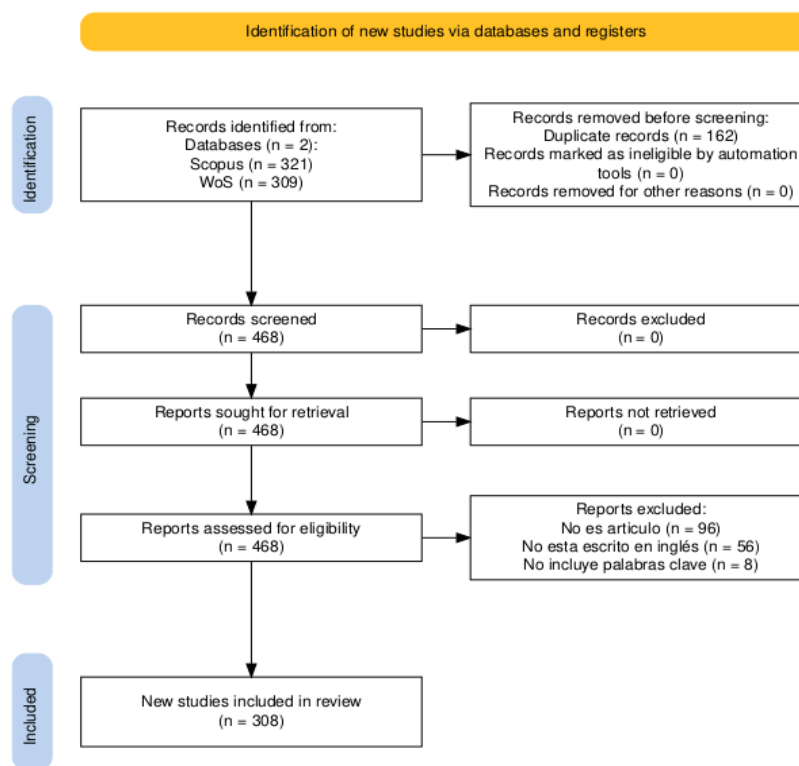
Se excluyeron estudios que no compararan ambos sistemas de cultivo, investigaciones sin enfoque químico (por ejemplo, estudios agronómicos o de rendimiento), literatura gris no arbitrada, artículos duplicados, tesis sin revisión por pares, y aquellos cuya información no pudiera ser verificada a texto completo.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se realizó revisando los títulos y resúmenes para descartar estudios irrelevantes y posteriormente se evaluaron los textos completos aplicando los criterios de inclusión y exclusión. Para la presentación de los resultados se utilizó el diagrama de flujo PRISMA 2020 (Haddaway et al., 2022).

Figura 1

Diagrama de flujo del estudio PRISMA desde la investigación inicial hasta la selección final de los artículos que se incluirán en esta revisión sistemática del 2018-2024.



Extracción de datos

Los datos fueron extraídos de forma sistemática mediante una ficha estructurada en Microsoft Excel. Las variables consideradas incluyeron: nombre del primer autor, año de publicación, país de origen, especie de café estudiada, tipo de manejo agrícola, técnica analítica

utilizada, metabolitos identificados, concentración promedio, y significancia estadística de los resultados. Esta organización facilitó la comparación transversal entre estudios y el análisis de patrones consistentes o divergentes.

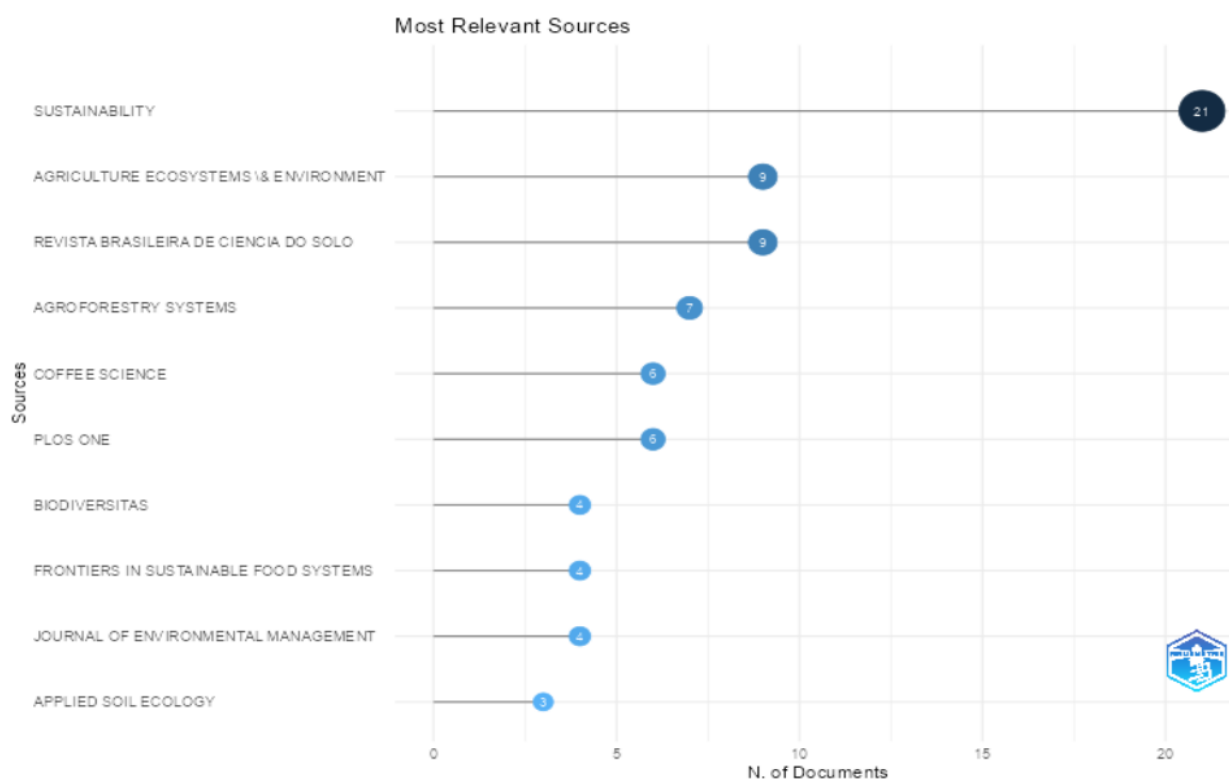
Resultados y Discusión

Síntesis y análisis de resultados

Se utilizó el paquete Bibliometrix en RStudio para desarrollar un análisis bibliométrico de los metadatos exportados, lo cual permitió visualizar las relaciones entre autores, países y palabras clave en el área de estudio.

Figura 2

Fuentes más relevantes Fuente: bibliometrix, 2025



Las revistas internacionales Sustainability e IOP Conference Series: Earth and Environmental Science son plataformas multidisciplinarias que publican investigaciones originales y artículos de revisión sobre una variedad de temas ambientales. Ambas fomentan la difusión de avances tecnológicos y prácticas innovadoras que contribuyen a la sostenibilidad y reducción de contaminantes ambientales. Estas publicaciones resultan especialmente relevantes

para abordar aspectos relacionados con la producción de café tradicional y orgánico, ya que incluyen estudios sobre técnicas de manejo sostenible, restauración de suelos degradados, reciclaje de subproductos agrícolas y métodos de tratamiento de aguas residuales. Además, proporcionan un espacio para explorar tecnologías de biorremediación y procesos ecológicos aplicables a cultivos agrícolas, como el café, promoviendo prácticas responsables y sostenibles en la industria cafetera. Revisiones similares han sido realizadas por algunos autores en las cuales han presentan el impacto de factores ambientales y manejo de adaptación en la calidad del café. Se necesitan más investigaciones sobre factores múltiples y la viabilidad de estrategias de adaptación climática para la sostenibilidad del sector cafetalero (Ahmed et al., 2021b).

El hecho de que SUSTAINABILITY triplique a casi todas las demás fuentes sugiere que las preguntas de investigación más frecuentes y apremiantes en este campo están enfocadas en la viabilidad a largo plazo de la producción de café, utilizando el análisis de metabolitos como una herramienta clave. Entendiendo que, en el café, estos perfiles metabolómicos se utilizan como biomarcadores que responden a las principales amenazas a la sostenibilidad.(Javier & Gambín, 2017), Por ejemplo La mayor amenaza para el café es la crisis climática y sus efectos secundarios (plagas, enfermedades, sequía) (Ogundeji et al., 2019). Los investigadores utilizan los perfiles de metabolitos para identificar variedades de café que son naturalmente más resistentes al calor y a la sequía antes de que el daño sea visible agronómicamente. Por ejemplo, una alta concentración de ciertos metabolitos protectores podría indicar una mayor tolerancia al estrés hídrico.(Ogundeji et al., 2019)

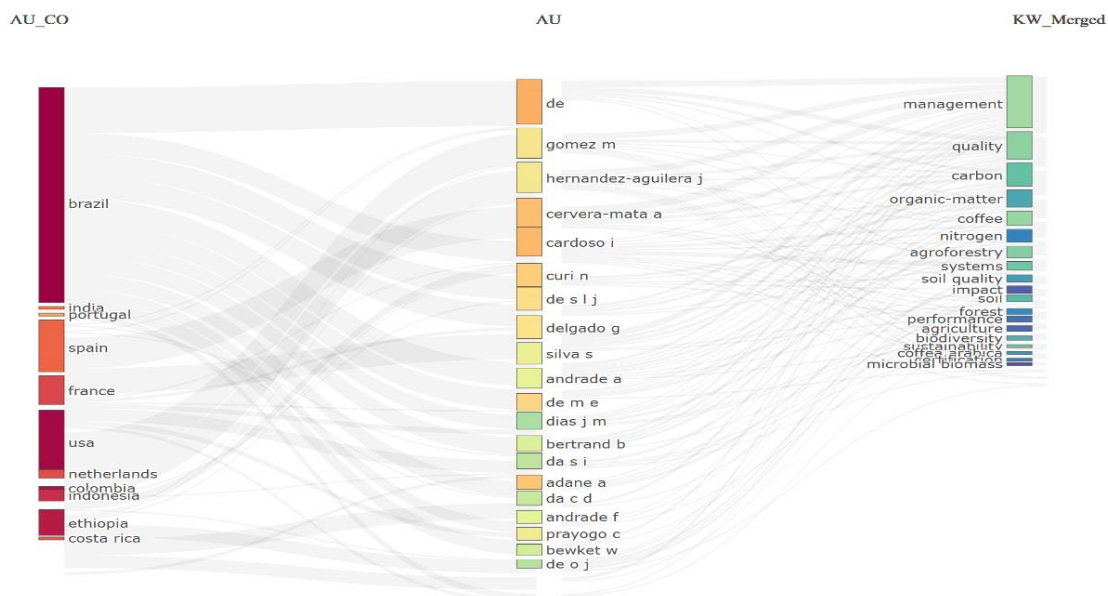
La implicación en Sostenibilidad: Permite la selección de cultivos más resilientes, reduciendo el riesgo de pérdida de cosechas y la necesidad de riego intensivo (Altieri et al., 2015)

Respuesta a Patógenos: Los metabolitos están intrínsecamente ligados a la defensa de la planta contra patógenos. Estudiar cómo la planta de café moviliza sus defensas químicas (metabolitos) ayuda a desarrollar variedades que necesiten menos fungicidas y pesticidas, un factor crucial para la salud ambiental del suelo y los ecosistemas (Ferrucho et al., 2024)

- Países de Afiliación del Autor (AU_CO) - Autores Individuales (AU) -Palabras Clave de la Investigación (KW_Merged)

Figura 3

Países de Afiliación del Autor (AU_CO) - Autores Individuales (AU) -Palabras Clave de la Investigación (KW_Merged bibliometrix, 2025)

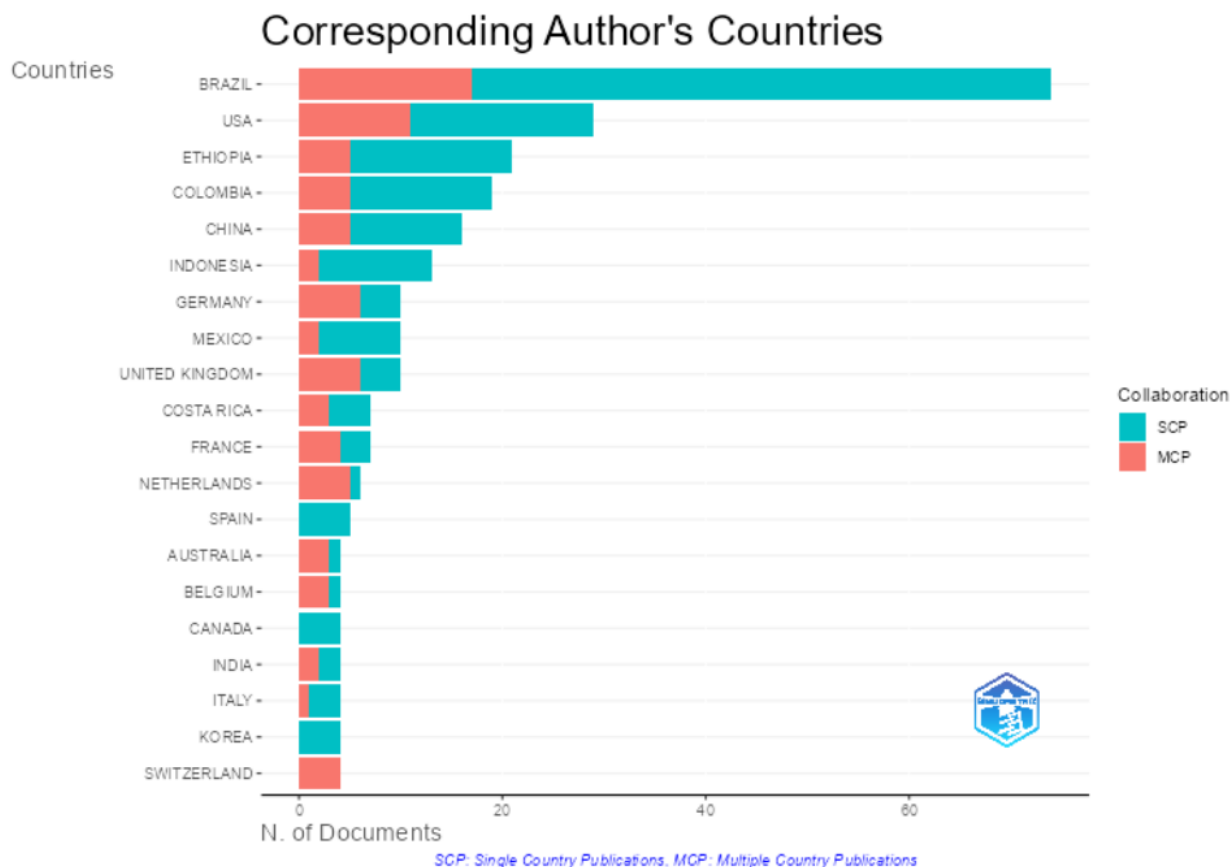


El diagrama de Sankey proporciona un contexto geográfico y temático crucial:

Las investigaciones predominan impulsadas por Brasil, el mayor productor y exportador del mundo (Ferrucho et al., 2024). La caficultura es una columna vertebral de su economía agrícola. Cualquier investigación que mejore la sostenibilidad, la calidad o la resistencia a plagas

tiene un impacto masivo y directo en el mercado global. Adicional produce café en una vasta extensión geográfica, lo que incluye una diversidad de climas y tipos de suelo (como los latosoles brasileños) (Ferrucho et al., 2024) Esto proporciona un laboratorio natural inigualable para estudiar cómo las diferentes condiciones ambientales y de manejo afectan el perfil de metabolitos del café.

La principal preocupación de estos autores brasileños, en el contexto de la sostenibilidad, es cómo gestionar y mejorar la calidad del suelo (carbono, materia orgánica) para garantizar la producción de café. El flujo muestra también cómo la investigación brasileña conecta a los autores con temas como calidad, suelo y sistemas agroforestales, que son componentes clave para la viabilidad a largo plazo de la caficultura en el país.

Figura 4*Países de autor correspondiente bibliométrix, 2025*

En este gráfico, Brasil con 72 documentos: muestra una inmensa base de investigación propia (barra azul SCP). Esto significa que la mayor parte de su producción es generada internamente, lo que confirma una infraestructura científica autónoma y robusta, tal como se discutió anteriormente. A su vez Etiopía con 22 documentos gran parte de su producción es SCP. Esto es significativo, ya que demuestra una capacidad de investigación local y enfocada en sus propios desafíos.

El patrón de alta colaboración (MCP) para EE. UU. (la barra roja en el gráfico es muy visible) sugiere que el país se posiciona como un eje de transferencia de tecnología y conocimiento avanzado. La investigación de metabolitos es una ciencia costosa y de alta

tecnología. Requiere infraestructura sofisticada, como espectrómetros de masas y resonancia magnética nuclear. Las principales universidades de EE. UU., los centros de investigación del Departamento de Agricultura (USDA) y las empresas privadas tienen acceso a esta tecnología. Al colaborar, los autores estadounidenses a menudo proporcionan la experiencia analítica y el equipamiento necesario para identificar y cuantificar los miles de metabolitos en las muestras de café. En lugar de simplemente analizar muestras en laboratorios de EE. UU., las colaboraciones permiten que las preguntas de investigación sean dirigidas por las necesidades agronómicas de los países productores (Brasil, Colombia, Etiopía). Los autores de EE. UU. se asocian con equipos locales para estudiar la café *in situ* y bajo las condiciones reales que afectan a la sostenibilidad (suelo, clima, plagas). El interés de EE. UU. en la investigación del café va más allá de lo académico; tiene importantes implicaciones comerciales y de seguridad alimentaria. (Ferreira et al., 2021)

EE. UU. es uno de los mayores consumidores de café del mundo. (Ferreira et al., 2021) La investigación enfocada en la sostenibilidad, la calidad y la resiliencia es vital para asegurar un suministro estable y predecible a largo plazo. Al financiar o coliderar proyectos, EE. UU. busca mitigar los riesgos asociados al cambio climático y las enfermedades del café (Ferreira et al., 2021)

Los metabolitos son la clave para la autenticación del café (garantizar el origen o la especie) y la certificación de la calidad. (Ferrucho et al., 2024) La alta colaboración en este campo permite a las instituciones estadounidenses establecer estándares de calidad y desarrollar métodos para prevenir el fraude en la cadena de suministro global, protegiendo así a los tostadores y consumidores en EE. UU (Ferreira et al., 2021)

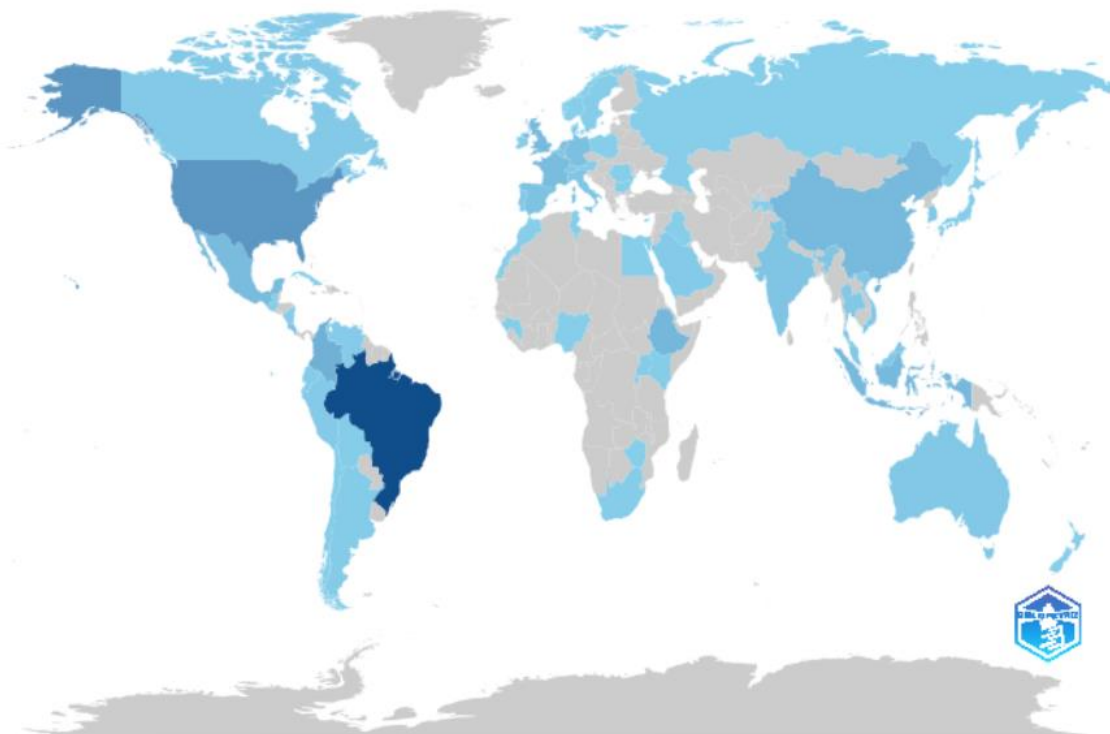
La colaboración de múltiples países a menudo implica una inyección de capital por parte de países desarrollados. Las agencias de financiamiento, Instituciones de EE. UU. y fundaciones privadas (o incluso grandes corporaciones cafeteras) financian becas y proyectos de campo en países productores. Estas subvenciones a menudo exigen colaboración internacional, lo que resulta directamente en un alto número de publicaciones MCP con afiliación estadounidense.

Es decir, la alta tasa de MCP en EE. UU. no es accidental. Refleja un papel de socio estratégico que aporta los recursos tecnológicos y la perspectiva del mercado global a la investigación de los metabolitos del café, asegurando que los hallazgos de sostenibilidad sean relevantes y aplicables a escala mundial.

Figura 5

Producción científica del país bibliométrix, 2025

Country Scientific Production



La investigación está altamente concentrada en los países productores más grandes (Brasil, Colombia, Etiopía) y en los líderes tecnológicos/consumidores (USA). La fuerte presencia de países de origen (Brasil, Etiopía, Colombia) subraya que las preguntas de sostenibilidad (suelo, clima, adaptación) están siendo abordadas en la fuente de producción. A pesar de ser un problema global, la producción científica no es uniforme y depende de la capacidad de investigación y la infraestructura en regiones específicas.

La vasta mayoría de África (excluyendo a Etiopía), gran parte de Asia Central y Oriente Medio aparecen en gris o azul muy claro, indicando una baja o nula contribución a la literatura sobre sostenibilidad y metabolitos del café.

Por lo anterior es importante mencionar que Etiopía es el lugar de nacimiento de *Coffe arabica*, la especie de café más valorada comercialmente, por ello su participación significativa y contribuyente a diferencia del resto de países africanos. Etiopía alberga la mayor diversidad genética de café arábica del mundo. Esta diversidad es crucial para la investigación de la sostenibilidad y los metabolitos, ya que proporciona la materia prima para identificar: Variedades con perfiles de metabolitos superiores (mejor calidad), genes de resistencia a plagas y enfermedades (soluciones de sostenibilidad), variedades resistentes a las condiciones extremas del cambio climático.(Mufa et al., 2011)

Cualquier estudio de metabolómica que busque la fuente de la variación química o la adaptación genética del café arábica debe incluir muestras y datos de Etiopía.(Kufa et al., 2011)

El café no es solo el principal producto de exportación del país, sino que está profundamente arraigado en la cultura. Esta importancia nacional impulsa la inversión gubernamental en instituciones agrícolas especializadas.(Kufa et al., 2011)

La posición de Etiopía como la cuna del café arábica le confiere un valor de investigación que ningún otro país africano puede igualar. Esto, sumado a una infraestructura nacional dedicada, explica por qué es el único país del continente que se destaca en esta investigación sobre la sostenibilidad y la química del café. (Kufa et al., 2011)

Figura 6

Nube de palabras bibliométrica, 2025



El campo de estudio se centra en cómo el MANAGEMENT (Gestión) del SOIL (Suelo), a menudo mediante el uso de AGROFORESTRY (Agrosilvicultura), impacta la QUALITY (Calidad) final del COFFEE (Café). Todo esto se lleva a cabo bajo el paraguas conceptual de la SUSTAINABILITY (Sostenibilidad). La presencia de términos como carbón, nitrógeno y materia orgánica demuestra que la gestión del suelo es vista como la vía principal para lograr la sostenibilidad del café.

Por lo anterior es importante mencionar que las investigaciones confirman un cambio de paradigma: el café ya no se ve solo como un producto de la planta, sino como el resultado de la salud del ecosistema del suelo. La gestión de la materia orgánica, el carbono y el nitrógeno son los mecanismos directos para alcanzar los tres pilares de la sostenibilidad. (Duić et al., 2015)

El enfoque en el carbón y la materia orgánica es una estrategia de sostenibilidad ambiental crucial. Los sistemas de agroforestería (agrosilvicultura) y las buenas prácticas de management del suelo buscan maximizar la cantidad de carbono que se almacena en el suelo. (Duić et al., 2015) El suelo actúa como un sumidero de carbono. Esta práctica mitiga el cambio climático al reducir el dióxido de carbono atmosférico y, simultáneamente, mejora la calidad del suelo. (Ferreira et al., 2021)

Una mayor materia orgánica mejora drásticamente la capacidad del suelo para retener agua (reduciendo el estrés por sequía) y nitrógeno (reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos). Esto hace que el sistema sea más resiliente frente a los eventos climáticos extremos, un requisito fundamental de la sostenibilidad (Altieri et al., 2015)

La QUALITY final del café (sabor, aroma) está directamente ligada a la composición de sus metabolitos, y la producción de estos metabolitos depende de la nutrición de la planta, que es regulada por el suelo. (Arbona et al., 2013). El management adecuado del suelo garantiza un suministro equilibrado de nutrientes esenciales (como el nitrógeno, el fósforo y micronutrientes). Estos nutrientes son los bloques de construcción que la planta utiliza para sintetizar sus metabolitos secundarios (ácidos clorogénicos, cafeína, compuestos volátiles). (Datta, 2020)

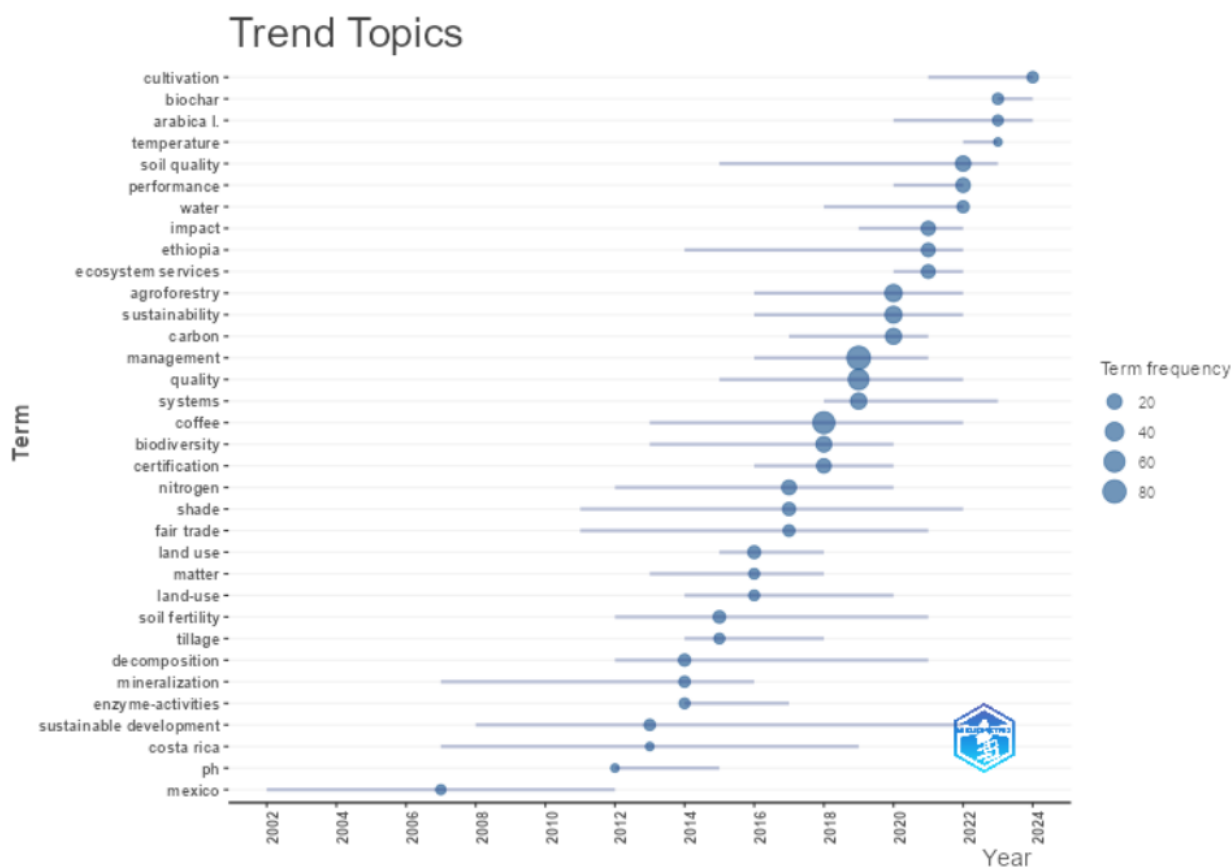
Un suelo bien gestionado, rico en materia orgánica y con actividad microbiana sana, reduce el estrés de la planta. Una planta menos estresada puede invertir más energía en la

producción de metabolitos de calidad (Rodríguez et al., 2021) que definen el sabor *gourmet*, en lugar de solo en metabolitos de defensa.

La gestión eficiente del suelo se traduce en sostenibilidad económica, que es la base del fair trade (comercio justo). Al aumentar la fertilidad natural del suelo a través de la materia orgánica y la fijación de nitrógeno (especialmente en sistemas agroforestales), se reduce la dependencia y el costo de los insumos externos como fertilizantes y pesticidas. Esto aumenta el margen de ganancia del agricultor. (Lucy et al., 2015). Los sistemas basados en el management de la agrosilvicultura y la mejora del suelo suelen tener rendimientos más estables a largo plazo que el monocultivo intensivo, lo que proporciona seguridad económica a las comunidades cafeteras y valida las primas pagadas bajo esquemas de sustainability y fair trade. (Cheng et al., 2016)

Figura 7

Temas de tendencia bibliométrica, 2025



El gráfico muestra un claro aumento en la frecuencia y la aparición de términos complejos a partir de 2014, lo que indica una respuesta a los desafíos globales:

Los términos carbón, Temperatura, e impacto climático aparecen con fuerza en la última década. La investigación se centra en cómo la producción de café puede mitigar o adaptarse al cambio climático. La aparición simultánea de Agroforestry y Sustainability refuerza la conclusión de que la Agrosilvicultura es la principal estrategia de Gestión para la sostenibilidad. El término Biochar aparece recientemente (alrededor de 2018-2020), pero se dispara hasta 2024.

El biochar (carbón vegetal) es una enmienda de suelo que mejora la retención de agua y el secuestro de carbono, una aplicación directa del management del suelo para la sostenibilidad. (Fiorella & Bartolí, 2019)

Los términos más frecuentes (Management, Quelite, Sustainability, Coffe, Systems) tienen puntos grandes, lo que confirma que son los conceptos centrales que impulsan la mayor parte de las publicaciones.

El tamaño significativo de Quelite y Performance en los años recientes subraya que, aunque la sostenibilidad es el marco, la investigación está impulsada por el objetivo de mantener la calidad bajo el estrés climático.

Estos datos pueden ir crecimiento debido al crecimiento en la conciencia ambiental y climática, el aumento de publicaciones coincide con la urgencia de documentar cómo la variabilidad climática afecta rendimiento, calidad y sostenibilidad del café.

Adicional el interés en la composición química y metabolómica del café genera un pico importante alrededor del año 2021 (ácidos clorogénicos, antioxidantes, aroma, sabor), impulsado por nuevas tecnologías analíticas (LC-MS, NMR).

El aumento significativo de documentos alrededor de 2021 en temas como calidad, rendimiento y arábica se debe a la madurez de las técnicas de alta resolución, que transformaron la investigación del café de estudios nutricionales básicos a análisis metabolómicos complejos.

El LC-MS es la herramienta más crucial para el estudio de los metabolitos del café, y su accesibilidad y precisión se han disparado en la última década.(Ahmed et al., 2021a)

Los ACGs son los metabolitos más abundantes en el café y los principales responsables de su actividad antioxidante. Las técnicas de LC-MS permiten (Campuzano-Duque et al., 2021):

Separar y cuantificar los múltiples isómeros de ACGs (más de 40). Esto es crucial porque los isómeros específicos influyen de manera diferente en la salud humana y en el sabor (amargor).

Analizar un gran número de muestras de café de manera rápida y con una sensibilidad extremadamente alta. Esto facilita los estudios a gran escala que correlacionan el manejo del suelo y el estrés climático con la composición antioxidante del grano.

La precisión del LC-MS permite a los investigadores correlacionar las prácticas de manejo sostenible (como el agroforestry o el uso de biochar) con la mejora o el mantenimiento de los niveles de metabolitos antioxidantes y de valor para la salud, que son indicadores de un producto de mayor calidad y precio. (Zhang et al., 2022)

La RMN es una técnica complementaria a la LC-MS, y su papel en el pico de 2021 se centra en la verificación y la autenticación.

La RMN puede proporcionar una "huella digital" rápida del perfil químico de una muestra completa de café sin necesidad de separar los compuestos individualmente. Esto es ideal para determinar si un café ha sido adulterado o si su origen es incorrecto, ya que la huella de RMN de un café etíope es diferente a la de uno brasileño. Esto apoya directamente la sostenibilidad económica del fair trade al proteger el valor de los cafés de origen.

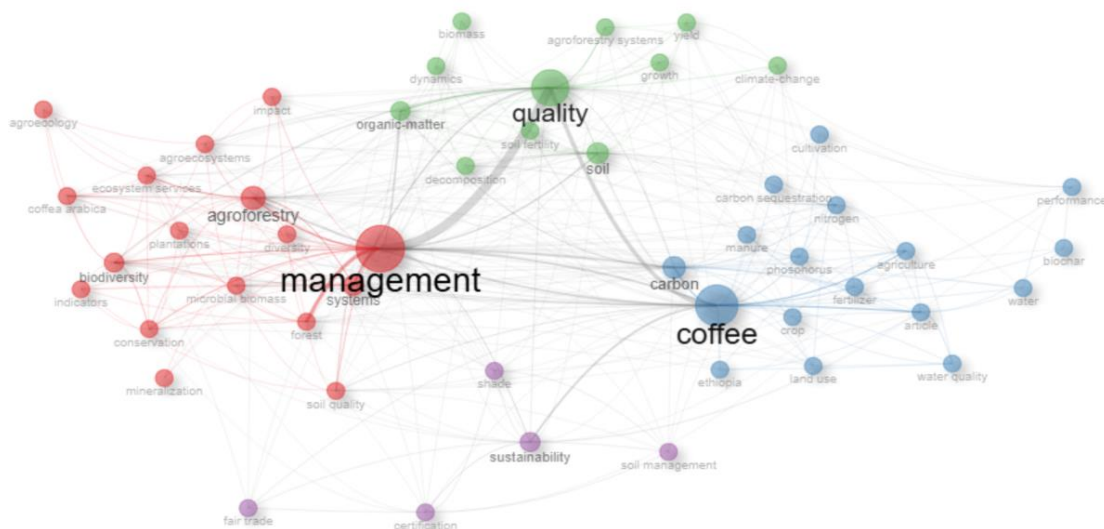
El pico alrededor de 2021 no es solo un avance tecnológico; es una convergencia de la tecnología con los temas dominantes vistos en los gráficos:

El análisis de alta resolución permite medir con precisión cómo cada práctica de management del suelo (carbono, nitrógeno) impacta directamente en los metabolitos que definen la quality y el sabor. (Rossi, 2023) Los estudios utilizan estas técnicas para rastrear cómo las

variaciones de temperature o la escasez de water (agua) cambian la producción de metabolitos defensivos en la planta, lo cual es esencial para la adaptación del cultivo.(Rossi, 2023)

Figura 8

Palabras claves bibliométrix, 2025



El mapa organiza el campo de estudio en cuatro clusters principales, representados por colores, que se entrelazan alrededor de los conceptos centrales de Management y Coffee:

Cluster Rojo: Agroforestería, Biodiversidad y Sistemas (El Pilar Ecológico)

Este cluster se enfoca en las prácticas agrícolas y sus beneficios ambientales directos.

Muestra que la investigación considera a la Agrosilvicultura como la principal estrategia de gestión para promover la biodiversidad y mantener los servicios ecosistémicos en las fincas de café. Este es el componente ecológico del manejo sostenible.

Cluster Verde: Calidad, Desempeño y Materia Orgánica (El Pilar de la Producción)

Este cluster se centra en los resultados directos de la producción y la salud del suelo.

Conecta la Calidad (Quality) (que sabemos que está ligada a los metabolitos) directamente con la salud del suelo (*Organic-matter* y *Soil fertility*). La investigación busca la correlación entre una buena gestión del suelo y un mejor rendimiento y calidad del grano, buscando la sostenibilidad económica.

Cluster Azul: Carbono, Nutrientes y Agronomía (El Pilar Bioquímico y Climático)

Este cluster abarca los elementos químicos y agronómicos que son fundamentales para la gestión del suelo.

Este es el cluster que contiene los desafíos globales y las soluciones técnicas. La palabra clave CARBON actúa como un nodo central, conectando el cultivo de COFFEE con la mitigación del Climate-change a través de la gestión de fertilizantes y el uso de tecnologías como el Biochar (que secuestra carbono en el suelo). Este cluster es donde se aborda la sostenibilidad técnica y la resiliencia climática.

Clúster Púrpura: Sostenibilidad, Ética y Certificación (El Pilar Sociopolítico)

Este cluster abarca los marcos normativos y éticos.

Los conceptos de Sostenibilidad y Comercio Justo (Fair Trade) se agrupan, mostrando que el objetivo ético y económico a menudo se aborda a través de los mecanismos de certificación y el management del suelo.

La cafeína, ácidos clorogénicos y trigonelina aparecen como nodos grandes y con muchas conexiones reflejan su alta frecuencia y centralidad en los artículos recientes, estos compuestos son biomarcadores clásicos de calidad y funcionalidad del café, lo que explica su prominencia en estudios de producción orgánica, donde se busca demostrar ventajas nutricionales y antioxidantes.

Es importante resaltar la baja presencia del término “convencional” o variantes aparecen como nodos pequeños, aislados o con pocas conexiones, esto sugiere que en Scopus hay pocos estudios que hagan explícito el contraste con “convencional”, la tendencia de la literatura es enfocarse en los beneficios del orgánico, y solo tangencialmente en la comparación.

Conclusiones

La investigación sobre la metabolómica del café presenta un fuerte incremento desde 2019, alcanzando un pico en 2021 y manteniéndose estable hasta 2024, este aumento se vincula con la expansión de la investigación en alimentos funcionales, el auge del café orgánico en el mercado y la incorporación de técnicas ómicas (LC-MS, metabolómica integrativa).

Los estudios sobre café orgánico tienen mayor presencia, destacando la identificación de metabolitos bioactivos clave como cafeína, ácidos clorogénicos y trigonelina, el café convencional aparece en menor medida, generalmente asociado a estudios de calidad o comparaciones directas, con menor diversidad temática.

El café orgánico se asocia fuertemente con técnicas modernas como LC-MS, lo que refleja un enfoque de alta sensibilidad para caracterizar metabolitos secundarios. El café convencional está más vinculado con métodos tradicionales como GC-MS y NMR, utilizados en análisis de compuestos volátiles o en estudios de química básica.

Ambos enfoques (orgánico y convencional) confluyen en temas comunes como actividad antioxidante y compuestos bioactivos, lo cual muestra la relevancia de estas propiedades para la industria y la salud. En el café orgánico, además, emergen conceptos asociados a sostenibilidad, producción limpia y certificaciones, ausentes en el grupo convencional.

Las redes de coautoría muestran clústeres fuertemente locales, con escasa interconexión entre países. Países productores (Brasil, Colombia,) tienen un papel clave en estudios aplicados, mientras que países con infraestructura analítica avanzada (EE. UU., Italia, Japón) dominan la parte metodológica.

La investigación confirma que el café orgánico concentra mayor diversidad temática y metodológica, mientras que el convencional mantiene un perfil más reducido y centrado en la calidad.

Esto refuerza la hipótesis de que la investigación orgánica está orientada a resaltar valor agregado (funcionalidad, salud, sostenibilidad), frente al enfoque más clásico del café convencional.

Referencias Bibliográficas

- Ahmed, S., Brinkley, S., Smith, E., Sela, A., Theisen, M., Thibodeau, C., Warne, T., Anderson, E., Van Dusen, N., Giuliano, P., Ionescu, K. E., & Cash, S. B. (2021a). Climate Change and Coffee Quality: Systematic Review on the Effects of Environmental and Management Variation on Secondary Metabolites and Sensory Attributes of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 708013.
<https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.708013/FULL>
- Ahmed, S., Brinkley, S., Smith, E., Sela, A., Theisen, M., Thibodeau, C., Warne, T., Anderson, E., Van Dusen, N., Giuliano, P., Ionescu, K. E., & Cash, S. B. (2021b). Climate Change and Coffee Quality: Systematic Review on the Effects of Environmental and Management Variation on Secondary Metabolites and Sensory Attributes of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 708013.
<https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.708013/FULL>
- Alexis, F., & Gallego, S. (2021). *Café de Colombia, análisis de los principales productores de café del mundo*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/8185>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/S13593-015-0285-2>
- Arbona, V., Manzi, M., de Ollas, C., & Gómez-Cadenas, A. (2013). Metabolomics as a Tool to Investigate Abiotic Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences* 2013, *Vol. 14*, Pages 4885-4911, *14*(3), 4885–4911.
<https://doi.org/10.3390/IJMS14034885>

- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Campuzano-Duque, L. F., Herrera, J. C., Ged, C., & Blair, M. W. (2021). Bases for the establishment of robusta coffee (*Coffea canephora*) as a new crop for Colombia. In *Agronomy* (Vol. 11, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/agronomy11122550>
- Chavarro Hurtado, B. A., & Vargas, A. (2022). Evaluar el Software Libre R para el Análisis de Espectros Infrarrojo Empleando Quimiometría. *Revista Ingenierías USBMed, ISSN-e 2027-5846, Vol. 13, N.º. 2, 2022, Págs. 48-55, 13(2), 48–55.*
<https://doi.org/10.21500/20275846.5155>
- Chekol, H., Warkineh, B., Shimber, T., Mierek-Adamska, A., Dąbrowska, G. B., & Degu, A. (2024). Drought Stress Responses in Arabica Coffee Genotypes: Physiological and Metabolic Insights. *Plants*, *13(6)*, 828. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13060828/S1>
- Cheng, B., Furtado, A., Smyth, H. E., & Henry, R. J. (2016). Influence of genotype and environment on coffee quality. *Trends in Food Science & Technology*, *57*, 20–30.
<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2016.09.003>
- Datta, Y. (2020). The U.S. Coffee Market: A Competitive Profile. *Journal of Economics and Public Finance*, *6(3)*. <https://doi.org/10.22158/jepf.v6n3p138>
- Duić, N., Urbaniec, K., & Huisingh, D. (2015). Components and structures of the pillars of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *88*, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.11.030>
- Ferreira, T., Galluzzi, L., de Paulis, T., & 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>

- Ferrucho, R. L., Marín-Ramírez, G. A., & Gaitan, A. (2024). Integrated Disease Management for the Sustainable Production of Colombian Coffee. *Agronomy 2024, Vol. 14, Page 1286, 14(6)*, 1286. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14061286>
- Giorcelli, M., & Bartoli, M. (2019). Development of Coffee Biochar Filler for the Production of Electrical Conductive Reinforced Plastic. *Polymers 2019, Vol. 11, Page 1916, 11(12)*, 1916. <https://doi.org/10.3390/POLYM11121916>
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews, 18(2)*, e1230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cl2.1230>
- Javier, F., & Gambín, M. (2017). *Estudio de perfiles metabolómicos asociados al consumo de Legumbres y Café. Aplicación de una Aproximación Metabolómica por Resonancia Magnética Nuclear en Estudios de Intervención Nutricional y Observacionales*. Universitat de Barcelona. <https://hdl.handle.net/2445/114409>
- Josué, Z., Estrada, H., Zorba, J., Hernández, E. M., En, C., Melissa Rodríguez, E. M., Samuel De Jesús, Á., Juárez, M., Juárez, D., Mirna, L., Suárez-Quiroz, D., Suárez-Quiroz, O. G.-R., González-Rios, O., & Figueroa-Hernández, D. C. (2024). Efecto del tostado en la composición química de los granos de café. *Contactos, Revista de Educación En Ciencias e Ingeniería, 135*, 5–15. <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/483>
- Kufa, T., Ayano, A., Yilma, A., Kumela, T., & Tefera, W. (2011). The contribution of coffee research for coffee seed development in Ethiopia. *E3 Journal of Agricultural Research and Development, 1(1)*, 9–016. <http://www.e3journals.org/EJARD>

- Li, R., Cheng, J., Liu, X., Wang, Z., Li, H., Guo, J., Wang, H., Cui, N., & Zhao, L. (2023). Optimizing drip fertigation at different periods to improve yield, volatile compounds and cup quality of Arabica coffee. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1148616. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1148616/BIBTEX>
- Lucy, A., Noguera, D., Perdomo, A. M., Escuela, R., Panamericana, A., & Honduras, Z. (2015). *Caracterización físico-química y sensorial de dos variedades de café (Coffea arabica) del occidente de Honduras.*
- Madrid Gambín, F. J. (2017). *Estudio de perfiles metabolómicos asociados al consumo de Legumbres y Café. Aplicación de una Aproximación Metabolómica por Resonancia Magnética Nuclear en Estudios de Intervención Nutricional y Observacionales.* Universitat de Barcelona. <https://hdl.handle.net/2445/114409>
- Márquez, F. R., Quispe, P., Molleapaza, N., Cabrera, S., & Peña, J. (2020). Relationship between soil characteristics and altitude with the sensory quality of coffee grown under agroforestry systems in Cusco, Peru. *Scientia Agropecuaria, 11*(4). <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.04.08>
- Mazzafera, P. (1999). Chemical composition of defective coffee beans. *Food Chemistry, 64*(4), 547–554. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00167-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00167-8)
- Miranda, A. M., Steluti, J., Fisberg, R. M., & Marchioni, D. M. (2017). Association between coffee. *Nutrients, 9*(3). <https://doi.org/10.3390/nu9030276>
- Ogundeji, B. A., Olalekan-Adeniran, M. A., Orimogunje, O. A., Awoyemi, S. O., Yekini, B. A., Adewoye, G. A., & Bankole, I. A. (2019). Climate Hazards and the Changing World of Coffee Pests and Diseases in Sub-Saharan Africa. *Journal of Experimental Agriculture International, 41*(6), 1–12. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2019/v41i630429>

R Core Team. (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.

<https://www.R-project.org/>

Robledo, S., Zuluaga, M., Arbelaez Echeverry, O., & Valencia Hernandez, L. A. (2025). *tosr*:

Create the Tree of Science from WoS and Scopus.

<https://doi.org/10.32614/CRAN.package.tosr>

Rocha, R. S., Simão, J. B. P., Peluzio, J. B. E., Ferrari, J. L., & de Amaral Gravina, G. (2019).

Influência da florada e adubação adicional em aspectos físicos e sensoriais de café arábica. *Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, *14*(4), 1–7.

<https://doi.org/10.5039/AGRARIA.V14I4A6015>

Rodrigues, A. M., Jorge, T., Osorio, S., Pott, D. M., Lidon, F. C., Damatta, F. M., Marques, I.,

Ribeiro-Barros, A. I., Ramalho, J. C., & António, C. (2021). Primary metabolite profile changes in coffeea spp. Promoted by single and combined exposure to drought and elevated co2 concentration. *Metabolites*, *11*(7).

<https://doi.org/10.3390/METABO11070427>

Rojas-Chacón, J. A., Echeverría-Beirute, F., Till, B. J., & Gatica-Arias, A. (2024). Assessment

of Hemileia vastatrix resistance in chemically mutagenized Coffea arabica L. leaf discs and the emergence of a novel resistance scale. *Journal of Plant Pathology* 2024 *106*:3,

106(3), 1093–1106. <https://doi.org/10.1007/S42161-024-01620-4>

Rossi, S. M. (2023). *Análisis genómico comparativo, filogenético y descriptivo de la vía*

biosintética de la cafeína en Ilex paraguariensis A. ST. HIL.

<https://rid.unam.edu.ar:443/handle/20.500.12219/5180>

Schauberger, P., & Walker, A. (2025). *openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files*.

<https://doi.org/10.32614/CRAN.package.openxlsx>

- Velmourougane, K., Prasanna, R., & Saxena, A. K. (2017). Agriculturally important microbial biofilms: Present status and future prospects. *Journal of Basic Microbiology*, *57*(7), 548–573. <https://doi.org/10.1002/JOBM.201700046>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Veracruzana, U., & Xalapa, R. (2024). *Efecto de diferentes tipos de fertilización sobre la calidad en taza de café*. <https://cdigital.uv.mx/handle/1944/53486>
- Watson, K., & Achinelli, M. L. (2008). Context and contingency: The coffee crisis for conventional small-scale coffee farmers in Brazil. *Geographical Journal*, *174*(3). <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2008.00277.x>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, *4*(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Yepes-Nuñez, J. J., Urrútia, G., Romero-García, M., & Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, *74*(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/J.RECESP.2021.06.016>
- Zhang, K., Ruiz, B., García, J. A., & Amérigo, M. (2022). Pro-environmental behaviour in China: analysing the impact of attitudinal and contextual factors (Comportamiento proambiental en China: analizando el impacto de los factores actitudinales y contextuales). *Psychology*, *13*(2), 232–257. <https://doi.org/10.1080/21711976.2022.2040829>;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;ISSUE:ISSUE:DOI