

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



PRODUCTIVIDAD Y RENTABILIDAD DEL CAFÉ, USO DE BOCASHI Y
DIFERENTES MANEJOS NUTRICIONALES

Tesis

Que presenta ALICIA GARCÍA MORENO
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Diciembre 2025

PRODUCTIVIDAD Y RENTABILIDAD DEL CAFÉ, USO DE BOCASHI Y
DIFERENTES MANEJOS NUTRICIONALES

Tesis

Elaborada por ALICIA GARCÍA MORENO como requisito parcial para obtener el
grado de Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría



Dr. José Luis Reyes Carrillo
Director de Tesis



Dr. Pedro Cano Ríos
Asesor



Dr. José Luis García Hernández
Asesor



Urbano Nava Camberos
Asesor



Dr. Eduardo Aron Flores Hernández
Asesor



Dr. Anselmo González Torres
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, por ser la universidad que me vio formarme como profesionista. Gracias a esta maravillosa y noble universidad que abraza a alumnos de todas partes, que desde el día uno en sus aulas te hace sentir en casa. A donde quiera que vaya siempre la llevaré muy en alto y con orgullo diré “Soy buitre de la Narro”.

SECIHTI, por la beca que me fue otorgada durante los tres años de mis estudios de doctorado. Gracias a este apoyo, mi formación académica y el desarrollo de este trabajo fueron mucho más accesibles y llevaderos.

Dr. José Luis Reyes Carillo, doctor, le expreso mi más profundo agradecimiento por todo el apoyo brindado desde el inicio de mis estudios. Destaco especialmente la paciencia con la que transmite sus conocimientos y la disposición constante para orientarme en cada duda y cada momento del proceso. Gracias a su guía he aprendido el valioso arte de redactar un artículo científico. Gracias, doctor, por ser esa abeja que lleva el polen de una inteligencia a otra, compartiendo generosamente su sabiduría y su pasión por la ciencia.

Dr. Pedro Cano Ríos, gracias doctor, por confiar en mi en todo momento. Gracias por creer en mi potencial y por sus palabras de aliento, porque, aunque usted no lo sepa, ha marcado mi vida de una manera extraordinaria, es para mí un modelo a seguir, una figura de éxito, ese éxito que tanto ansío alcanzar. ¡Gracias!

Dr. Urbano Nava Camberos, le expreso mi profundo agradecimiento por el valioso tiempo que dedicó al análisis e interpretación de los datos de este trabajo de investigación. Reconozco y valoro su paciencia, su disposición y el compromiso mostrado con este proyecto, los cuales fueron fundamentales para su desarrollo.

Dr. José Luis García Hernández, le agradezco el interés y apoyo brindado desde el inicio del desarrollo de este trabajo de investigación. Sin su ayuda, muchas cosas habrían sido más difíciles; gracias por facilitarnos los medios para llevar a cabo y concluirlo con éxito este trabajo.

Dr. Roberto Sánchez Lucio, de todo corazón Roberto, le agradezco la confianza que depositó en mí, por todo el apoyo que me brindó para que yo pudiera realizar mi investigación, gracias por poner en mis manos el trabajo que me permitiría llegar a este momento. Gracias porque sin su ayuda esto no hubiera sido posible.

DEDICATORIA

A Dios, por la vida que me regala cada día, por darme un corazón que late con fuerza, por mis ojos que me permiten ver y por mi cerebro que me permite analizar. Gracias, señor, por la vida tan maravillosa que me has regalado, por cada aprendizaje que ha marcado mi vida y por cada momento decisivo que me ha llevado a estar aquí.

A mis padres Agustín García y Ofelia Moreno, a ustedes que siempre han estado para mí sin importar mi edad. A mi madre por ser el pilar más fuerte en la familia, por sus oraciones y por ser el mejor ejemplo de resiliencia. A mi padre, por su amor y forma de proteger, por siempre inculcarme el estudio y el hambre de superación.

A mi esposo Alexis Madariaga, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y su amor incondicional. Gracias porque nunca me dejas caer y por ser el mejor compañero de vida que pude tener.

A mi hijo Elian Sebastián, por ser mi motor de vida y el motivo para querer ser mejor persona.

A mis hermanas y hermanos, gracias por ser mi alegría y el amor más bonito que llevaré en mi corazón por siempre.

CARTA DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS

3

Decisión del editor/a Recibidos x

a

adminojs@ujat.mx

para mí

mar, 29 jul, 17:42

español

español

Traducir correo

←

→ Re

Parece que este mensaje está en inglés

×

Traducir al español

José Luis Reyes Carrillo, MC Alicia García Moreno, Dr Roberto Sánchez Lucio, Dr José Luis García Hernández, Dr Urbano Nava Camberos, Dr Pedro Cano Ríos:

Hemos tomado una decisión sobre su envío a **Ecosistemas y Recursos Agropecuarios**, "Evaluation of bocashi as an organic coffee nutrition alternative".

Nuestra decisión es: Aceptado

José-Luis Reyes-Carrillo <jlreyes54@gmail.com>

para Alicia, pedro, José, Urbano

mié, 30 jul, 10:08

español

español

Traducir correo

←

→ Re

...

José Luis Reyes Carrillo
profesor-investigador
Departamento de Biología
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna
"Los libros son las abejas que llevan el polen de una inteligencia a otra" "Books are the bees which carry the quickening pollen from one to another mind."



[TSAES] Envío recibido ⇒ Recibidos x



Carlos A. SANDOVAL-CASTRO

para mí ▾



español ▾



español ▾

Traducir correo



Parece que este mensaje está en inglés



[Traducir al español](#)

Tropical and Subtropical Agroecosystems

Dr. JOSE LUIS REYES-CARRILLO:

Gracias por enviarnos su manuscrito "RESPUESTA DE DIFERENTES MANEJOS NUTRICIONALES EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CAFÉ (Coffea arabica L.)" a Tropical and Subtropical Agroecosystems. Gracias al sistema de gestión de revistas online que usamos podrá seguir su progreso a través del proceso editorial identificándose en el sitio web de la revista:

URL del manuscrito:

<https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/author/submission/6714>

Nombre de usuario/o: jlreyes54

Si tiene cualquier pregunta no dude en contactar con nosotros/as. Gracias por tener en cuenta esta revista para difundir su trabajo.

Carlos A. SANDOVAL-CASTRO

Tropical and Subtropical Agroecosystems

Tropical and Subtropical Agroecosystems

<http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA>

ÍNDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO	
DEDICATORIA	iii
CARTA DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
Resumen	viii
Abstract	ix
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	4
El café	5
Producción de café en México	5
Descripción y desarrollo de la planta	7
Fenología del café	8
Factores agronómicos del cultivo	8
Composición y características del fruto	10
Calidad del café	10
Capacidad antioxidante	11
Clasificación de los antioxidantes	12
Compuestos fenólicos	12
Nutrición del café	13
Nutrición Orgánica	15
Fertilización mineral	17
Consideraciones para hacer un plan nutricional en el cultivo de café	18
Uso de fertilización mineral combinada con fertilización orgánica	19
Alimentos orgánicos	20
Salud del suelo y agricultura orgánica	21
Agricultura Orgánica	22
Abonos orgánicos	24
Compost	26
Etapas del compostaje	26
Estabilidad y madurez del compost	28
Bocashi	29
Proceso de elaboración del bocashi	30
Temperatura y Unidades calor (UC)	32

REFERENCIAS CITADAS.....	33
Artículo 1. Evaluación del uso de bocashi en la productividad y rentabilidad en el cultivo de café.....	41
Artículo 2. Respuesta de diferentes manejos nutricionales en la productividad del café (<i>Coffea arabica</i> L.).....	55
CONCLUSIÓN GENERAL.....	73

Resumen

Productividad y rentabilidad del café, uso de bocashi y diferentes manejos nutricionales

Alicia García Moreno
Doctorado en Ciencias en Producción Agropecuaria
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Doctor José Luis Reyes Carrillo
Director de tesis

La demanda de alimentos orgánicos y la falta de manejos nutricionales adecuados ha impulsado investigaciones orientadas a optimizar la nutrición del café mediante insumos alternativos y manejos diferenciados. En este contexto, se desarrollaron dos estudios complementarios. El primero evaluó el abono bocashi en la productividad y la rentabilidad de su aplicación a distintas dosis. El segundo, tuvo como objetivo evaluar la nutrición orgánica e inorgánica en la calidad nutracéutica, crecimiento y rendimiento. El primer experimento, establecido en una plantación de cafetos criollos incluyó cuatro tratamientos (0, 3, 6 y 9 kg árbol⁻¹) con un diseño de bloques al azar. El incremento en la dosis de bocashi elevó significativamente el rendimiento, alcanzando hasta 0.47 t ha⁻¹ más que el testigo con 9 kg árbol⁻¹, y mejoró el tamaño del fruto, pero el análisis económico evidenció que solo la dosis de 3 kg árbol⁻¹ resulta rentable bajo un precio mínimo de \$ 19.14 kg⁻¹ del café. El segundo estudio contó con 3 tratamientos nutricionales 1) sin manejo, 2) compost de cáscara de café y 3) urea; las variables de calidad y rendimiento se correlacionaron con las Unidades Calor acumuladas y tuvo como resultado que la nutrición inorgánica registró el mayor rendimiento y capacidad antioxidante, mientras que la orgánica presentó los valores más altos en fenoles y flavonoides totales. El crecimiento del fruto mostró una fuerte correlación con las unidades calor acumuladas. Se concluyó que ambos estudios evidencian que, la nutrición del cafeto influyó en la productividad, desarrollo del fruto y calidad nutracéutica.

Palabras clave: Abono fermentado, *Coffea arabica*, Producción orgánica, Flavonoides, Fenoles.

Abstract

Coffee productivity and profitability, use of bocashi and different nutritional management

Alicia García Moreno

Doctorado en Ciencias en Producción Agropecuaria
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Doctor José Luis Reyes Carrillo
Director de tesis

The demand for organic food and the lack of adequate nutritional management have driven research aimed at optimizing coffee nutrition through alternative inputs and differentiated management practices. In this context, two complementary studies were developed. The first evaluated the effects of bocashi fertilizer on productivity and profitability at different application rates. The second aimed to evaluate the effects of organic and inorganic nutrition on nutraceutical quality, growth, and yield. The first experiment, conducted in a plantation of criollo coffee trees, included four treatments (0, 3, 6, and 9 kg tree⁻¹) using a randomized block design. Increasing the bocashi dose significantly increased yield, reaching up to 0.47 t ha⁻¹ more than the control with 9 kg tree⁻¹, and improved fruit size. However, the economic analysis showed that only the 3 kg tree⁻¹ dose was profitable under a minimum coffee price of \$19.14/kg⁻¹. The second study included three nutritional treatments: 1) no management, 2) coffee husk compost, and 3) urea. Quality and yield variables were correlated with accumulated heat units. The results showed that inorganic nutrition resulted in the highest yield and antioxidant capacity, while organic nutrition presented the highest values for total phenols and flavonoids. Fruit growth showed a strong correlation with accumulated heat units. It was concluded that both studies demonstrate that coffee plant nutrition influences productivity, fruit development, and nutraceutical quality.

Keywords: Fermented fertilizer, *Coffea arabica*, organic production, Flavonoids, Phenols.

INTRODUCCIÓN

El café es la bebida estimulante no alcohólica más comercializada del mundo (Gómez-Martínez, 2019). Los principales productores de café a nivel mundial son Brasil, Colombia y Vietnam (SADER, 2018), en tanto que México ocupa la undécima posición; en México se produce café de gran calidad, en donde el principal productor es el estado de Chiapas el cual aporta el 41 % del volumen nacional, seguido por Veracruz con 24 % y Puebla con un 15.3 %. (SADER, 2022). Las exportaciones se destinan principalmente a Estados Unidos y a países miembros del bloque de la Unión Europea, además de Japón, Cuba y Canadá (SADER, 2018). México es uno de los principales productores y exportadores de café orgánico (SADER, 2015), por lo que se busca que la combinación de las características como el clima y suelo, además del factor humano, permitan la máxima expresión de las cualidades intrínsecas del café, generando los elementos necesarios para lograr su posicionamiento en el mercado de calidad superior (Osorio, 2021; Martínez *et al.*, 2024a).

La nutrición es un factor determinante para la cantidad y calidad de las cosechas en la mayoría de los cultivos; sin embargo, en el caso del café, el suministro adecuado de nutrientes adquiere una relevancia adicional debido a su influencia directa en las características organolépticas de los granos y por lo tanto, en la calidad de taza (INIFAP, 2021a). Generalmente el contenido de nutrientes que el suelo tiene como reserva no es suficiente para conseguir los rendimientos esperados, por lo que es necesario llevar a cabo acciones que permitan incrementar y mantener la fertilidad del suelo, y así satisfacer las necesidades del cultivo (Sadeghian-Khalajabadi, 2010). La fertilización no sólo cumple un papel agronómico, sino que también tiene implicaciones económicas que afectan la rentabilidad del cultivo debido a los elevados costos de fertilización (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b). Se ha encontrado que la producción de café puede disminuir en más de 40 % cuando no se realiza la labor de la fertilización, para proporcionar los elementos requeridos (Sadeghian-Khalajabadi, 2010).

La variación del requerimiento nutricional del cultivo de café tiene un rango amplio que depende de factores como la variedad, el rendimiento esperado, la edad de

la planta, y factores de manejo, como la densidad de población. Por lo tanto no solo se tiene que tomar en cuenta los datos proporcionados de extracción de nutrientes por parte del cultivo ni tratar de generalizarla dentro de una misma localidad (INIFAP, 2021a).

La nutrición tanto química como la orgánica juegan un papel importante en el desarrollo del cultivo de café. Por su alta concentración de nitrógeno (46 %), la urea es la fuente de fertilización química más utilizada, aunada a su menor costo por unidad de elemento suministrado (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b). Fuentes sintéticas frecuentemente citadas en la bibliografía cafetera incluyen, sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, nitrato de amonio (HNO_3) , fosfatos monoamónico-MAP $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, fosfatodiamónico-DAP $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, cloruro de potasio (KCl) y sulfato de potasio (K_2SO_4) (Sadeghian-Khalajabadi, 2013).

Dentro de la fertilización orgánica destacan el compost y lombricompost de pulpa de café, la gallinaza, la pollinaza, el estiércol vacuno, el encalamiento y las cenizas. No obstante, el abono orgánico más utilizado en las huertas cafetaleras es el compost de pulpa de café (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

En el manejo orgánico del café se deben considerar tanto la fuente de nutrientes como la eficiencia en el uso de nutrientes por parte de las plantas (Martinez *et al.*, 2024a). La nutrición orgánica puede complementar o incluso sustituir totalmente a la fertilización química sin comprometer la productividad, siempre que se asegure el suministro adecuado de nutrientes en las cantidades requeridas por las plantas de café (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

La producción orgánica puede ser una alternativa interesante desde el punto de vista medioambiental, social y económico, ya que no contamina el medio ambiente ni las personas directa e indirectamente involucradas, además de agregar mayor valor al producto final (Ricci *et al.*, 2006). Los abonos orgánicos son el resultado de procesos de descomposición y mineralización de residuos vegetales, animales e industriales, que aplicados al suelo, pueden ayudar a mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Murillo-Montoya *et al.*, 2020). Un abono poco estudiado en el cultivo de café es el bocashi, un abono fermentado a base de una mezcla equilibrada de materias orgánicas de origen

vegetal y animal (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013). Algunos de los principales ingredientes de bocashi son: estiércol animal, carbón triturado, salvado, residuos de cosecha, cal, melaza, levadura suelo tamizado y agua (Quiroz y Céspedes, 2019). El bocashi posee una cantidad considerable de macro y micronutrientes, por lo que su uso favorece la nutrición y desarrollo de las plantas (Mendivil-Lugo *et al.*, 2020). Dentro de los beneficios de la utilización del bocashi destaca, la incorporación de microorganismos benéficos al suelo, los cuales llevan a cabo el proceso de fermentación en la biomasa disponible, la cual favorece la multiplicación y acción de la microbiota benéfica existente en el suelo (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013; Quiroz y Céspedes, 2019). Se ha encontrado que el uso de bocashi mejoró la germinación de semillas de rábano (Mendivil-Lugo *et al.*, 2020), aumentó el rendimiento en lechuga (Hata *et al.*, 2020), remolacha y repollo (Kruker *et al.*, 2023), influyó significativamente en las respuestas fisiológicas del orégano (Santos *et al.*, 2020) y aumentó la altura y el rendimiento en berenjena (Amalia *et al.*, 2020).

Estudios indican que las fuentes de nutrientes orgánicos e integrados (orgánico-inorgánico) pueden proporcionar nutrientes suficientes para el crecimiento adecuado del cultivo de café. Además, el uso del manejo integrado de la fertilidad podría ser la mejor opción, dado que reduce tanto los costos de fertilizantes inorgánicos como la cantidad de fertilizantes orgánicos requerida para un crecimiento eficiente del café (Chemura, 2014). Así mismo, algunos trabajos muestran que en conjunto el manejo orgánico e inorgánico suelen mejorar indicadores de suelo, como la microbiota y el contenido de materia orgánica del suelo. También mantienen o incrementan el rendimiento frente a aplicar solo uno de los dos manejos, especialmente en suelos degradados (Velmourougane, 2016; Jiang *et al.*, 2023).

Sea cual sea la fuente de nutrición empleada, la respuesta del cultivo a los diferentes manejos dependerá en gran medida de las condiciones edáficas, climáticas, la edad del cafetal y las prácticas agronómicas previas; por ello, diversos estudios recomiendan ajustar las dosis de fertilización con base en análisis de suelo y pruebas locales, con el fin de evitar tanto deficiencias como

pérdidas de nutrientes (Zhao *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2024). En este sentido, la integración del razonamiento por casos y el conocimiento técnico puede optimizar la toma de decisiones en el manejo nutricional, garantizando un uso más eficiente y adaptado a las condiciones particulares de cada sistema productivo (León-Chilito *et al.*, 2025).

REVISIÓN DE LITERATURA

El café

Botánicamente, el café pertenece a la familia Rubiaceae, que incluye cerca de 500 géneros y más de 6,000 especies, en su mayoría árboles y arbustos de zonas tropicales (Rojo y Pérez, 2014). El género *Coffea* comprende 124 especies distribuidas principalmente en las regiones tropicales húmedas de África y en islas del océano Índico como Comoras, Mauricio, Reunión y Madagascar. Las plantas de café pueden desarrollarse en una amplia gama de suelos y elevaciones, desde el nivel del mar hasta más de 2000 m.

Aunque existen diversas especies dentro del género, *C. arabica* y *C. canephora* var. robusta son las más cultivadas a escala mundial. *C. arabica*, predominante en Centroamérica y Sudamérica, posee su centro primario de diversidad genética entre los 1300 y 2000 m de altitud (Gómez-Martínez, 2019). Esta especie fue descrita por Linneo en 1753 y destaca por su condición tetraploide, lo que implica que cuenta con 44 cromosomas, a diferencia de las especies diploides que presentan 22 (Rojo y Pérez, 2014).

Las principales regiones productoras de café incluyen países de América, África y Asia, destacando Brasil como el mayor productor mundial. Mientras que Brasil exporta principalmente cafés duros, Colombia y varios países centroamericanos se reconocen por sus cafés suaves de alta calidad. En el “viejo mundo”, Vietnam lidera la exportación, aunque cafés de Kenia e India son especialmente valorados por su calidad (Rojo y Pérez, 2014).

Producción de café en México

El café se introdujo en México en 1796 y, desde entonces, su producción se desarrolló a pequeña y mediana escala, principalmente en haciendas y ranchos. Durante el Porfiriato, la cafecultura mexicana experimentó un crecimiento significativo, impulsado por grandes empresas transnacionales que establecieron extensos cafetales. Estos se ubicaron principalmente en las vertientes de las cadenas montañosas del centro y sur del país, en terrenos con pendientes de ligeras a muy pronunciadas, bajo sistemas agroforestales (INIFAP, 2021b).

Actualmente, el cultivo de café se concentra en cuatro macrorregiones con condiciones agroecológicas adecuadas, abarcando 12 estados, además de otros productores en el Estado de México, Michoacán y Morelos.

Según Barrientos (1990), estas regiones son:

1. Vertiente del Golfo de México. Comprende los estados de San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Veracruz, parte de Oaxaca y Tabasco.
2. Vertiente del Océano Pacífico. En ésta se localizan los estados de Colima, Guerrero, Jalisco, Nayarit y parte de Oaxaca.
3. Región Soconusco. Está conformada por gran parte del estado de Chiapas en la vertiente del Pacífico.
4. Región centro-norte de Chiapas.

En México se producen cafés de excelente calidad, lo que coloca a nuestra nación como la undécima en producción mundial. Nuestro país es un lugar ideal para su cultivo debido a su altura, climas y suelos, lo cual le permite cultivar variedades clasificadas dentro de las mejores del mundo (SADER, 2022). México es el principal productor y exportador de café orgánico, donde el 3.24 % del total de la superficie nacional cafetalera se cultivada para este producto y exporta 28.000 toneladas sobre todo a la Unión Europea (SADER, 2018).

En México, el café es un cultivo estratégico, su producción emplea a más de 500 mil productores de 15 entidades federativas y municipios (SADER, 2022). El principal productor de café en México es el estado de Chiapas el cual aporta el 41 por ciento del volumen nacional, seguido por Veracruz con 24 por ciento y Puebla con un 15.3 por ciento. La producción mexicana de café cereza fue en promedio de 899 mil toneladas en el periodo 2017-2021; (SADER, 2022), con un rendimiento de 1.58 ton ha⁻¹ y una superficie plantada de 701,393.42 ha, con un valor de 6,518,722.33 (SIAP, 2023b). En el contexto de mercados, las exportaciones se destinan más del 50 % a Estados Unidos; el volumen restante, a países miembros del bloque de la Unión Europea y otros como Japón, Cuba y Canadá (SADER, 2018).

Descripción y desarrollo de la planta

El cafeto es un arbusto perenne de porte recto, cuya altura puede alcanzar hasta seis metros en *C. arabica* en estado silvestre, aunque en plantaciones comerciales se mantiene alrededor de tres metros, dependiendo del sistema de manejo (Gómez-Martínez, 2019). Su ciclo de vida en condiciones de cultivo puede extenderse entre 20 y 25 años. La planta inicia la producción de frutos en ramas de un año, alcanza su máxima productividad entre los seis y ocho años, y puede continuar produciendo durante muchos años con niveles decrecientes de rendimiento (Pulgarín, 2007).

Las hojas son perennes, elípticas u oblongas, de superficie cerosa y coriácea; presentan un color verde oscuro y brillante en el haz y más pálido en el envés, permaneciendo en la planta de tres a cinco años. En *C. arabica*, el color de las hojas puede variar según la variedad, y su tamaño oscila entre 7 y 20 cm de largo y 2.5 a 8 cm de ancho (Gómez-Martínez, 2019), dichas hojas se mantienen durante tres a cinco años (SIAP, 2023a). Las hojas de *C. arábica* son de color verde claro o bronce dependiendo de si la planta es de origen Bourbon o Typica, y miden de 7 a 20 cm de largo y de 2.5 a 8 cm de ancho (Gómez-Martínez, 2019). El sistema radicular principal es pivotante, generalmente múltiple, alcanzando unos 45 cm de profundidad y rara vez hasta un metro (Gómez-Martínez, 2019). La floración ocurre tras el periodo de lluvias, generalmente cuando la planta tiene entre 3 y 4 años y recibe 8 a 11 horas de luz. Las flores aparecen en racimos en las axilas foliares y los nudos de las ramas. La flor, de 1 a 1.5 cm de diámetro, presenta una corola tubular blanca con cinco lóbulos, cinco estambres y un pistilo; la polinización ocurre en las 6 h posteriores a la apertura floral y la fertilización se completa entre 24 y 48 h (Gómez-Martínez, 2019). La primera floración, definida como el momento en que al menos el 50 % de las plantas florecen, marca el inicio de la etapa reproductiva, que culmina con la maduración de los frutos y la cosecha (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

El fruto del café es una baya drupácea conocida como cereza, uva o capulín, compuesta por pulpa (mesocarpio), epidermis (exocarpio) y un mucílago azucarado que recubre las dos semillas enfrentadas, denominadas granos de

café. Cada semilla está protegida por el pergamino (endocarpio) y una película plateada. La maduración fisiológica de la semilla varía entre 180 y 330 días después de la fecundación, dependiendo de la variedad y la zona cafetalera (IICA, 2019). Los frutos verdes se tornan rojos al madurar en un periodo de 7 a 9 meses, y cada fruto contiene habitualmente dos semillas planas (IICA, 2019). El fruto está cubierto por una fina capa denominada pergamino. En su interior, las semillas -los granos de café- contienen una compleja mezcla de compuestos químicos (SIAP, 2023a). Los frutos son inicialmente verdes y de forma ovalada, y adquieren un color rojo al alcanzar la madurez, proceso que ocurre entre 7 y 9 meses después de la floración. Cada fruto suele albergar dos semillas planas y enfrentadas, características de la mayoría de los cafés comerciales (Rojo y Pérez, 2014).

Fenología del café adaptada según Unigarro (2022) y Ramírez (2014)

El crecimiento del fruto de café tiene una curva de crecimiento sigmoideal, dividida en cuatro etapas.

Etapa I. Esta etapa cubre desde la floración hasta 50 días aproximadamente, es una etapa de crecimiento lento.

Etapa II. Transcurre entre los 50 y 120 días en promedio, el fruto crece de manera acelerada y adquiere su tamaño final, y la semilla tiene consistencia gelatinosa.

Etapa III. Transcurre entre los 120 y 180 días, la semilla o almendra completa su desarrollo, adquiere consistencia sólida y gana peso.

Etapa IV. Transcurre entre los 180 y los 224 días, el fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado y comienza a madurar.

Etapa V. >225 DDF (días después de la floración).

Las etapas II y III son las etapas de mayor demanda de agua y de nutrientes del fruto, y es donde se debe garantizar la mayor disponibilidad de ambos factores.

Factores agronómicos del cultivo

El café es una especie que puede desarrollarse bajo una amplia gama de condiciones productivas, desde sistemas agroforestales diversificados hasta monocultivos a pleno sol, dependiendo de las características agroecológicas del

entorno y de los objetivos de cada productor (Gómez-Martínez, 2019). Sin embargo, para alcanzar un desarrollo óptimo, el cultivo requiere de suelos ricos en materia orgánica, con buena capacidad de retención y drenaje de agua, características que suelen encontrarse en suelos formados por la descomposición de hojarasca y roca volcánica desintegrada (SIAP, 2023a).

Entre los factores ambientales determinantes para el cultivo destacan la temperatura, la precipitación, la radiación solar, el viento y la composición del suelo, aunque las exigencias específicas varían según la variedad de *Coffea* que se cultive. En México, la temperatura media anual óptima para el crecimiento del café oscila entre 17 y 23 °C, mientras que la altitud (variable estrechamente relacionada con la calidad del grano y la temperatura ambiente) suele encontrarse entre 600 y 1,500 msnm para *C. arabica* (INIFAP, 2021a).

La altitud influye directamente sobre el microclima, de modo que en regiones más alejadas del ecuador el *C. arabica* puede cultivarse a menores alturas, siempre que se eviten zonas con riesgo de heladas. Esta especie prospera mejor por encima de 800 msnm, en terrenos con desnivel moderado, donde las condiciones térmicas y de humedad favorecen su fisiología (Rojo y Pérez, 2014; INIFAP, 2021a).

En cuanto a la precipitación, *C. arabica* requiere entre 1,100 y 2,000 mm anuales, con un periodo seco de 3 a 4 meses, el cual estimula la floración. No obstante, un déficit prolongado de agua limita el crecimiento vegetativo y el desarrollo del fruto, mientras que el exceso de lluvia puede afectar negativamente el inicio de la floración (Rojo y Pérez, 2014; IICA, 2019).

Respecto al suelo, las plantas de *Coffea* se desarrollan mejor en suelos profundos, bien drenados y con pH ligeramente ácido (menor a 7). Además, el cultivo es sensible a los vientos fuertes, el granizo y la radiación solar directa, por lo que se recomienda el uso de rompevientos y la implementación de árboles de sombra que contribuyan a estabilizar el microclima y proteger las plantas (Rojo y Pérez, 2014).

La temperatura incide directamente en procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, el desarrollo foliar y la formación de botones florales. Valores

inferiores a 18 °C favorecen el crecimiento vegetativo, pero reducen la diferenciación floral; en contraste, temperaturas superiores a 22 °C aceleran el desarrollo vegetativo, afectando la floración y la fructificación del cultivo (IICA, 2019).

Composición y características del fruto

El fruto del café está conformado por varias capas: exocarpio, mesocarpio, endocarpio, piel plateada y endospermo (grano). El exocarpio, también llamado cáscara, constituye la capa más externa y está formado por una sola capa de células parenquimatosas con cloroplastos, capaces de absorber agua. El mesocarpio o mucílago corresponde a la pulpa del fruto y es una capa rica en azúcares. Más internamente se encuentra el endocarpio, conocido como pergamino, que es la cubierta dura que protege al grano. Sobre la semilla se localiza el espermodermo o piel plateada, mientras que el endospermo (el grano propiamente dicho) rodea al embrión y le aporta almidón, proteínas y aceites (Bastian *et al.*, 2021).

En cuanto a su composición química, un grano de café contiene aproximadamente 34 % de celulosa, 30 % de azúcares, 11 % de proteínas, entre 6 y 13 % de agua y de 2 a 15 % de materia grasa. También aporta minerales como potasio, calcio, magnesio y fósforo, así como ácidos orgánicos (principalmente clorogénicos) y alcaloides, entre los que destacan la cafeína (1 – 2.5 %) y la trigonelina (Rojo y Pérez, 2014).

Calidad del café

En el café, la calidad está estrechamente relacionada con el compromiso del productor a lo largo de toda la cadena productiva para obtener una bebida con atributos sensoriales destacados. Esta calidad se define a partir de un conjunto de características químicas, físicas, microbiológicas y sensoriales que motivan al consumidor a pagar un precio más alto, generando así mayores ingresos para el caficultor. La interacción entre las condiciones ambientales (como el clima y el suelo) y las prácticas humanas permite que el café exprese plenamente sus

cualidades intrínsecas, creando las condiciones necesarias para posicionarlo en mercados de alta calidad (Osorio, 2021; Martínez *et al.*, 2024a).

Capacidad antioxidante

Los antioxidantes son compuestos de distinta naturaleza química que se caracterizan por su capacidad para contrarrestar la acción de los radicales libres, moléculas altamente reactivas y dañinas que se generan durante procesos de oxidación en los alimentos y en el organismo. Un antioxidante puede definirse como cualquier sustancia capaz de inhibir o retardar significativamente la oxidación de un sustrato, aun cuando esté presente en concentraciones relativamente bajas (Bajaj y Ballal, 2021). Los antioxidantes aportan importantes beneficios a la salud, ya que ayudan a prevenir o retardar la aparición de enfermedades degenerativas. Por ello, se recomienda incrementar el consumo de frutas y vegetales, considerados la fuente más importante de antioxidantes naturales (Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez, 2019).

El estrés oxidativo se presenta cuando la formación de radicales libres supera la capacidad del organismo para neutralizarlos, lo que ocasiona un aumento en el daño oxidativo de macromoléculas como carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Los antioxidantes son compuestos capaces de retrasar, impedir o reducir de manera significativa la oxidación de otras moléculas, incluso cuando se encuentran en concentraciones mínimas. Al neutralizar los radicales libres, estas sustancias previenen el deterioro de componentes esenciales para el adecuado funcionamiento bioquímico del cuerpo. Entre los principales antioxidantes destacan los compuestos fenólicos, cuya importancia radica en su elevada capacidad antioxidante, atribuida a la presencia de múltiples grupos hidroxilos en los anillos aromáticos (Abarca-Vargas y Petricevich, 2021).

El café constituye una fuente destacada de antioxidantes y es, además, una de las bebidas más consumidas a nivel mundial. Su composición incluye tanto compuestos fenólicos como no fenólicos, responsables de su potencial actividad antioxidante. Dentro de los primeros se encuentran el ácido clorogénico y el ácido cafeico, mientras que entre los segundos sobresale la cafeína. Si bien los

radicales libres cumplen funciones fisiológicas necesarias, como la participación en la apoptosis celular, su acumulación excesiva puede provocar daños en proteínas y ácidos nucleicos, contribuyendo al desarrollo de enfermedades graves, entre ellas el cáncer (Bajaj y Ballal, 2021).

Clasificación de los antioxidantes

Los antioxidantes pueden clasificarse en endógenos y exógenos. Los antioxidantes producidos naturalmente en el cuerpo se denominan antioxidantes endógenos, mientras que los adquiridos a través de la dieta se denominan antioxidantes exógenos. Los antioxidantes exógenos se clasifican en vitaminas, betacaroteno, ubiquinona y polifenoles.

Los antioxidantes exógenos pueden ser:

- Antioxidantes naturales
- Proteínas de alto y bajo peso molecular
- Antioxidantes de origen vegetal

El principal enfoque de estudio son los antioxidantes de origen vegetal, ya que la muestra de prueba es el café. Los metabolitos secundarios de las plantas que actúan como antioxidantes son principalmente fenoles y a menudo se les denomina polifenoles debido a la presencia de varios sustituyentes hidroxilo fenólicos (Bajaj y Ballal, 2021).

Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos son moléculas ampliamente presentes en la naturaleza, especialmente en el reino vegetal. Muchos de ellos son responsables de la coloración característica de las plantas, así como de diversos efectos benéficos para la salud humana (Abarca-Vargas y Petricevich, 2021). Bajo esta denominación se agrupa un conjunto diverso de sustancias que comparten la presencia de un grupo funcional hidroxibencénico (fenol) enlazado a estructuras aromáticas o alifáticas. Se estima que existen más de ocho mil tipos estructurales

diferentes, los cuales se clasifican según el número de anillos fenólicos y los grupos funcionales que contienen; de manera general, se dividen en tres grandes categorías: taninos, lignanos y flavonoides (Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez, 2019).

Dentro de estos compuestos, el ácido clorogénico destaca como el principal componente fenólico presente en el café verde. Esta molécula está constituida por la unión de un ácido quínico con una o más moléculas de ácido trans-hidroxicinámico (Bastian *et al.*, 2021).

Nutrición del café

La nutrición es un factor determinante para la cantidad y calidad de las cosechas en la mayoría de los cultivos; sin embargo, en el caso del café, el suministro adecuado de nutrientes adquiere una relevancia adicional debido a su influencia directa en las características organolépticas de los granos y, por lo tanto, en la calidad de taza. Asimismo, la nutrición impacta el tamaño y la cantidad de los granos producidos, aspectos fundamentales para la productividad y competitividad del cultivo (INIFAP, 2021c) .

Generalmente el contenido de nutrientes que el suelo tiene como reserva no es suficiente para conseguir los rendimientos esperados, por lo que es necesario llevar a cabo acciones que permitan incrementar y mantener la fertilidad del suelo, y así satisfacer las necesidades del cultivo. Se ha encontrado que la producción de café puede disminuir en más de 40 % cuando no se realiza la labor de la fertilización, para proporcionar los elementos requeridos (Sadeghian-Khalajabadi, 2010).

De manera adicional, los cafetos que reciben fertilización adecuada no solo presentan mayor rendimiento y calidad de grano, sino que también desarrollan mayor resistencia frente a plagas, enfermedades, sequía y otros factores ambientales estresantes. Esto evidencia que la nutrición equilibrada contribuye integralmente al desempeño agronómico y fisiológico del cultivo (Sadeghian-Khalajabadi, 2013). En el contexto actual, los productores de café enfrentan un mercado global altamente competitivo, lo que hace imprescindible analizar los

factores que influyen en la rentabilidad del cultivo, entre ellos el costo de los fertilizantes, que constituye uno de los componentes más significativos dentro de los sistemas de producción (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b). Frente a este escenario, la sostenibilidad económica y agronómica del cultivo requiere optimizar el uso de los fertilizantes con base en análisis de suelos, lo que permite ajustar las dosis de acuerdo con la disponibilidad real de nutrientes.

Asimismo, se promueve el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en las fincas, el estímulo a la actividad microbiana del suelo, la implementación de prácticas de control de la erosión, la realización de deshierbes oportunos y la asociación del cafeto con otras especies capaces de aportar nutrientes o mejorar su reciclaje dentro del sistema productivo. Estas estrategias contribuyen tanto a la reducción de costos como al fortalecimiento de la fertilidad y resiliencia del agroecosistema (Sadeghian-Khalajabadi, 2008a).

La baja eficiencia en el aprovechamiento de los fertilizantes en los cafetales hace necesario el desarrollo de estrategias de manejo más precisas. En este sentido León-Chilito *et al.* (2025) señalan que los sistemas de recomendación de fertilización deben sustentarse en métodos de razonamiento por casos y en conocimientos técnicos especializados, de manera que las dosis y frecuencias de aplicación puedan ajustarse adecuadamente a las condiciones específicas de suelo, clima y estado fenológico del cultivo, evitando pérdidas innecesarias de nutrientes y reduciendo el impacto ambiental.

Esta necesidad de precisión coincide con las recomendaciones planteadas por el INIFAP (2021c), el cual subraya que, independiente del tipo de fertilizante empleado (ya sea químico u orgánico), el productor debe considerar varios elementos fundamentales antes de diseñar un programa nutricional. Entre ellos destacan: identificar los requerimientos nutrimentales del cultivo conforme a su etapa de desarrollo; definir las metas productivas en función del potencial de la variedad establecida y de las condiciones edáficas y climáticas; cuantificar la oferta nutrimental del suelo mediante análisis de laboratorio; y diseñar un programa de nutrición complementaria acorde con la demanda del cultivo y la disponibilidad real de nutrientes. Además, es indispensable reconocer la

eficiencia relativa de las fuentes químicas seleccionadas y, finalmente, calibrar y validar en campo la dosis recomendada para asegurar los efectos esperados sobre el desarrollo y rendimiento. La necesidad de implementar este tipo de prácticas se vuelve aún más evidente si se considera que solo entre el 50 y 60 % de los fertilizantes aplicados al cultivo de café son realmente aprovechados por las plantas, mientras que el resto se pierde en el sistema, generando contaminación y aumentando los costos de producción (León-Chilito *et al.*, 2025). Una herramienta indispensable antes de diseñar un programa nutricional es el uso de análisis de suelo cuyo propósito central es orientar la aplicación de fertilizantes simples en cantidades ajustadas a los requerimientos del cultivo, de modo que se suministre únicamente lo necesario y se reduzcan los costos de producción, además de minimizar pérdidas y riesgos ambientales (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

Si bien los registros históricos de fertilidad a escala regional pueden servir en algunos casos como referencia para definir estrategias de manejo en áreas con condiciones relativamente homogéneas, esta alternativa es limitada. Cuando no se dispone de indicadores precisos que permitan conocer la disponibilidad nutrimental del suelo, los planes de manejo general constituyen la mejor alternativa. De cualquier forma, disponer de la mayor cantidad de información posible para la toma de decisiones reduce significativamente el riesgo de errores en la recomendación de fertilización (Sadeghian-Khalajabadi, 2013).

Es importante señalar que las recomendaciones de fertilización se expresan en kilogramos de nutriente o de fertilizante por hectárea, y no en gramos por planta, ya que en esta fase del manejo nutricional existe competencia entre individuos. Por tanto, la estrategia se orienta a poblaciones completas y no a plantas individuales, lo que asegura una mayor coherencia con la dinámica del sistema productivo (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

Nutrición Orgánica

La fertilización orgánica puede complementar o incluso sustituir totalmente a la fertilización química sin comprometer la productividad del cafeto, siempre que se

asegure el suministro adecuado de nutrientes en las cantidades requeridas por la planta (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b). Aunque el manejo orgánico ofrece beneficios ambientales importantes, su adopción puede implicar costos iniciales elevados y limitaciones en la capacitación técnica, lo que dificulta su implementación eficiente en algunos sistemas cafetaleros (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b; Jones *et al.*, 2025). Dentro de estos sistemas, la principal fuente de materia orgánica disponible en las huertas es la pulpa de café, un subproducto abundante y con alto potencial de reciclaje (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

La calidad del suelo se refleja directamente en la productividad y en la calidad física y sensorial del grano, lo cual influye en las características bioquímicas del café y, en última instancia, en su calidad en taza. En este sentido, la elaboración de mezclas orgánicas que aporten las cantidades y proporciones adecuadas de nutrientes a lo largo del ciclo fenológico del cafeto representa una alternativa viable. Sin embargo, este proceso añade complejidad al manejo debido a la necesidad de formular mezclas equilibradas y garantizar la mineralización previa de la materia orgánica, requisito indispensable para que los nutrientes sean disponibles para la absorción radicular (Martinez *et al.*, 2024b).

La importancia de una nutrición equilibrada también ha sido documentada en estudios que relacionan la disponibilidad de micronutrientes con la calidad del café. En un análisis realizado en seis regiones productoras de café orgánico en México, Rosas-Arellano *et al.* (2008) encontraron que el zinc influye de manera directa en la calidad física y organoléptica del grano; el manganeso afecta la forma del grano; calcio, magnesio e hierro inciden en la fragancia; el fósforo en el aroma; mientras que la materia orgánica y el nitrógeno contribuyen al aroma en nariz. La extracción nutrimental del fruto muestra la relevancia de estos elementos, pues el grano remueve del sistema aproximadamente 107 g de Fe, 61 g de Mn, 50 g de B, 33 g de Cu y 18 g de Zn (Sadeghian-Khalajabadi *et al.*, 2006).

Por otro lado, estudios en sistemas orgánicos estiman que, para alcanzar una producción de 800 kg de café verde por hectárea, el cultivo requiere

aproximadamente 51.5 kg de N, 10.66 kg de P_2O_5 y 37.5 kg de K_2O por año. De estos, 34 kg de N, 6 kg de P_2O_5 y 8 kg de K_2O se exportan fuera del sistema a través del grano, mientras que los nutrientes contenidos en la cáscara y la pulpa pueden reincorporarse mediante procesos de compostaje, cerrando de esta forma el ciclo nutrimental (Naturland, 2000).

Fertilización mineral

La demanda nutricional del cultivo de café puede variar ampliamente, pues depende de factores como la variedad cultivada, el nivel de rendimiento esperado, la edad de las plantas y características de manejo, entre ellas la densidad de población. Por esta razón, no es suficiente basarse únicamente en las cifras de extracción de nutrientes ni generalizar estos valores dentro de una misma región (INIFAP, 2021c).

Las necesidades nutrimentales del cafeto se determinan principalmente en torno a los macronutrientes N, P y K. De ellos, el nitrógeno es indispensable y nunca debe excluirse de un plan de fertilización. Además, cuando los suelos presentan niveles bajos de materia orgánica ($\leq 8\%$), se recomienda aplicar las dosis más altas de N para asegurar un adecuado desarrollo del cultivo (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

Entre las fuentes de fertilizantes más utilizadas en la nutrición del café se encuentran:

- Nitrogenadas y fosfatadas: Urea (46 % N), DAP (18 % N, 46 % P_2O_5), MAP (11 % N, 52 % P_2O_5), sulfato de amonio (21 % N, 24 % S) y mezclas comerciales como 10-30-10 o 10-40-10.
- Potásicas: Cloruro de potasio (60 % K_2O) y sulfato de potasio (50 % K_2O , 17 % S).
- Fuentes de magnesio: Óxido de magnesio (88 % MgO), kieserita (25 % MgO, 20 % S) y nitrato o carbonato de magnesio (Sadeghian-Khalajabadi y González-Osorio, 2012).

La urea, por su alta concentración de nitrógeno (46 %) y su bajo costo por unidad nutrimental, es la fuente nitrogenada más empleada en cafetales. Aunque su

aplicación genera cierta acidez en el suelo, este efecto es menor en comparación con otros fertilizantes como el sulfato de amonio. Este último puede utilizarse alternado con urea en suelos con pH superior a 6.0 y con deficiencias de azufre (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b).

El diseño del plan de nutrición debe partir de los análisis de suelo. En caso de no disponer de estos resultados, se recomienda utilizar las dosis más altas de cada nutriente para asegurar que las plantas reciban los elementos esenciales para su desarrollo (Sadeghian-Khalajabadi y González-Osorio, 2012).

Consideraciones para hacer un plan nutricional en el cultivo de café

Tabla 1. Dosis de fertilización en base el nutriente

Nutriente	Dosis min/ha (kg/ha/año)	Dosis max/ha (kg/ha/año)
N	250	300
P ₂ O ₅	50	50
K ₂ O	200	250
MgO	20	40

Fuente: (Sadeghian-Khalajabadi, 2017; DaMatta *et al.*, 2019)

Tabla 2. Dosis de fertilización en base al tipo de fertilizante

Fertilizante	Equivalente min kg/ha	Equivalente max kg/ha
Urea (46 % N)	543.47	652.17
MAP (52 % P ₂ O ₅)	96.15	96.15
KCl (60 % K ₂ O)	333.33	416.66

Fuente: (Sadeghian-Khalajabadi, 2017; DaMatta *et al.*, 2019)

En cafetales con más de dos años después del trasplante, se recomienda realizar tres aplicaciones anuales de fertilizante, utilizando una mezcla compuesta por 100 kg de urea, 50 kg de DAP y 25 kg de KCl, aplicando 200 g por planta en cada fertilización (INIFAP, 2021c). De manera similar, Castillo *et al.* (1994) sugieren que, en sistemas de producción en México, el fertilizante se divida en tres aplicaciones durante la etapa productiva. La primera debe efectuarse entre marzo

y abril con una dosis de 90–70 kg de NP/ha; la segunda debe aportar 90–70–90 kg de NPK/ha, y la tercera, aplicada entre septiembre y octubre, debe incluir 90–90 kg de N–K/ha.

La dosis de fertilización también debe ajustarse según las condiciones de sombra y densidad del cultivo. En lotes con niveles de sombra entre 35 y 45 % y densidades medias, se recomienda aplicar el 85 % de la dosis base; cuando la densidad del cafetal es baja, la aplicación debe reducirse al 75 % (Sadeghian-Khalajabadi, 2008b). Para plantaciones con alrededor de 55–60 % de sombra y una densidad de 3,333 plantas/ha, se han propuesto dosis de 10 kg de N, 130 kg de K y 25 kg de P por hectárea al año (Sadeghian-Khalajabadi y González-Osorio, 2012).

En general, cuando el cafetal presenta menores densidades de siembra y mayores niveles de sombra, los requerimientos nutricionales disminuyen; sin embargo, debe mantenerse la proporcionalidad entre los nutrientes aplicados para no alterar el balance nutricional de la planta (Sadeghian-Khalajabadi, 2013).

Uso de fertilización mineral combinada con fertilización orgánica

La interacción entre fertilización orgánica y mineral juega un papel clave en la productividad del café. La evidencia sugiere que los esquemas integrados pueden igualar o superar el rendimiento de la fertilización química sola, especialmente bajo variaciones en el riego y las condiciones edáficas. Esto fundamenta las recomendaciones nutricionales que se presentan en los siguientes apartados. Durante cinco temporadas consecutivas se evaluó el efecto de combinar fertilizantes orgánicos (compost convencional) y fertilizantes inorgánicos NP en el crecimiento agronómico y en las propiedades del suelo del cultivo de café (*C. arabica*). Los tratamientos incluyeron distintas proporciones de ambas fuentes de nutrientes. El mayor rendimiento se obtuvo aplicando una combinación del 50 % de nitrógeno y fósforo provenientes de fertilizantes inorgánicos junto con 50 % de cáscara de café descompuesta, alcanzando 2083.5 kg/ha. En contraste, el rendimiento más bajo (1570.5 kg/ha) se observó en el tratamiento sin fertilización. A lo largo de los cinco años, las combinaciones

de fertilizantes orgánicos e inorgánicos mostraron componentes de rendimiento estadísticamente equivalentes a los obtenidos únicamente con fertilización NP. Asimismo, se registraron diferencias significativas en la altura de las plantas según la fuente nutrimental: los fertilizantes inorgánicos generaron los cafetos más altos (348.23 cm), mientras que la ausencia de fertilización produjo plantas considerablemente más bajas (200.49 cm) después de dos años (Atnafu *et al.*, 2021).

Otros estudios respaldan que tanto las fuentes orgánicas como las combinadas (orgánico–inorgánico) pueden aportar la cantidad necesaria de nutrientes para un adecuado desarrollo del café. Además, el manejo integrado de la fertilidad se perfila como una alternativa eficiente, ya que reduce los costos asociados a los fertilizantes inorgánicos y disminuye la cantidad de abono orgánico requerido para mantener un crecimiento óptimo del cultivo (Chemura, 2014) y señala que los fertilizantes inorgánicos son más efectivos cuando se cuenta con altos niveles de riego, mientras que los abonos orgánicos presentan un mejor desempeño bajo condiciones de menor disponibilidad de agua. En general, los abonos orgánicos favorecen el desarrollo vegetativo bajo condiciones de baja disponibilidad hídrica, mientras que los fertilizantes minerales presentan mejor respuesta en condiciones de mayor riego

Alimentos orgánicos

En años recientes, la agricultura orgánica ha adquirido una importancia considerable dentro de los sistemas de producción. Esto se debe a que los alimentos obtenidos bajo este enfoque representan una alternativa favorable tanto para los consumidores, que demandan productos más saludables y sostenibles, como para los productores, quienes buscan prácticas agrícolas más equilibradas. Como resultado, los productos orgánicos se han integrado progresivamente en los hábitos y estilos de vida de la población (Das *et al.*, 2020). La seguridad alimentaria, la salud humana y las preocupaciones relacionadas con el deterioro ambiental ejercen una influencia directa sobre las preferencias de los consumidores. Diversos estudios señalan que, aunque la mayoría de los

consumidores manifiestan una percepción favorable hacia los productos orgánicos, su adquisición frecuente es limitada debido al costo adicional asociado a estos alimentos (Eyinade *et al.*, 2021). De manera paralela, y en oposición a los impactos ecológicos derivados de sistemas agrícolas con altos niveles de insumos, el interés por alimentos libres de residuos de pesticidas y obtenidos mediante prácticas sostenibles ha incrementado notablemente durante las últimas décadas (Martínez *et al.*, 2024a).

Diversos estudios han señalado que las personas que mantienen de manera constante una dieta basada en productos orgánicos lo hacen principalmente por motivos relacionados con los beneficios percibidos para la salud, la preocupación por el impacto ambiental y la valoración de adquirir productos locales. En particular, los consumidores con mayor conciencia sobre su salud tienden a evitar alimentos convencionales que podrían contener residuos de pesticidas, hormonas u otros aditivos, prefiriendo opciones orgánicas promovidas como más naturales y libres de compuestos químicos (Rahman *et al.*, 2024).

Asimismo, se ha propuesto que la disposición a pagar por alimentos orgánicos está influenciada por múltiples factores, entre ellos los aspectos culturales y demográficos, las actitudes individuales, la conciencia sanitaria, las normas personales, el nivel de conocimiento del consumidor, la seguridad alimentaria percibida, la preocupación ambiental y la calidad nutricional atribuida. No obstante, pese a que la percepción general hacia los productos orgánicos es favorable y sus beneficios suelen ser reconocidos, el precio continúa representando una limitante relevante para su consumo habitual (Li *et al.*, 2020).

Salud del suelo y agricultura orgánica

La salud del suelo se conceptualiza como la capacidad sostenida del suelo para desempeñar sus funciones dentro de un ecosistema vivo esencial, proporcionando soporte a las plantas, los animales y a la población humana (Brevik *et al.*, 2020; M. Tahat *et al.*, 2020; Kurniawati *et al.*, 2023). Su estado influye de manera directa en aspectos como el empleo, la seguridad alimentaria

y la reducción de la pobreza, elementos fundamentales para la estabilidad económica (Brevik *et al.*, 2020).

Las prácticas agrícolas pueden afectar la salud y la calidad del suelo principalmente a través de dos vías: la pérdida física de la capa superficial, asociada con procesos de erosión, y la disminución de la materia orgánica, la estructura y la actividad biológica del suelo, lo que conduce a su degradación. Se ha documentado que ciertos insumos agrícolas, como los fertilizantes sintéticos nitrogenados, disminuyen la abundancia y diversidad de hongos micorrícicos. Asimismo, múltiples investigaciones han demostrado que el uso intensivo de fuentes nitrogenadas reduce la síntesis de fitoquímicos involucrados en la defensa vegetal, entre ellos los compuestos fenólicos presentes en el follaje (Montgomery y Biklé, 2021).

Si bien las prácticas agrícolas contemporáneas han permitido incrementar los niveles de productividad, también han favorecido procesos adversos como la oxidación de la materia orgánica, el deterioro de la fertilidad del suelo, la erosión, la salinización extensiva y la generación de grandes cantidades de residuos y gases de efecto invernadero, principalmente derivados del uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Martinez *et al.*, 2024a). Además, la limitada restitución de nutrientes característica de los sistemas intensivos de altos insumos, sumada al uso frecuente de pesticidas, altera de manera significativa el microbioma natural del suelo (Frąc *et al.*, 2022).

Agricultura Orgánica

La agricultura orgánica constituye un sistema de producción que, además de buscar la reducción o eliminación de residuos de pesticidas en los alimentos, promueve un enfoque integral de sostenibilidad que abarca dimensiones económicas, ambientales y sociales (Hata *et al.*, 2020).

Este enfoque ha adquirido relevancia mundial debido al incremento en la demanda de alimentos más seguros y nutritivos. La implementación de prácticas orgánicas mejora la friabilidad y fertilidad del suelo al favorecer la estabilidad de los agregados, incrementar el contenido de materia orgánica (MO) e influir

positivamente en la estructura y dinámica de las comunidades microbianas (Abebe *et al.*, 2022). Asimismo, estas prácticas pueden incrementar de manera significativa la eficiencia en el uso del nitrógeno (N) por parte de los cultivos y disminuir las pérdidas de NH_3 por volatilización. El aumento de la MO facilita la disponibilidad de nutrientes, provee sustratos para los microorganismos nativos y contribuye al mayor secuestro de carbono (C) en agroecosistemas orgánicos, además de fortalecer la agregación del suelo (Bhunja *et al.*, 2021). A largo plazo, la incorporación continua de fertilizantes orgánicos y la acumulación de carbono edáfico favorecen la retención de nitrógeno en forma de N microbiano o compuestos orgánicos estabilizados, incrementan la presencia de microorganismos desnitrificantes y reducen la emisión de N_2O al promover la finalización de la ruta de desnitrificación hacia la formación de N_2 (Lazcano *et al.*, 2021).

Los fertilizantes orgánicos constituyen fuentes naturales derivadas de materiales reciclados de origen vegetal o animal, caracterizados por su elevado contenido de nutrientes. Estos insumos contribuyen a mejorar la actividad y composición de la comunidad microbiana del suelo, fortalecen su capacidad de retención y conservación, incrementan la fertilidad edáfica y, en consecuencia, elevan la calidad de los productos agrícolas obtenidos, entre otros beneficios reportados se incluyen la disminución de la contaminación hídrica y la reducción del uso de insumos externos no renovables (Abebe *et al.*, 2022).

La agricultura orgánica se fundamenta en cuatro principios esenciales: salud, ecología, equidad y cuidado. El principio de salud establece que este sistema debe mantener y promover el bienestar del suelo, las plantas, los animales, los seres humanos y el entorno en su conjunto. El principio de ecología enfatiza la necesidad de que la agricultura orgánica funcione en armonía con los sistemas ecológicos vivos, apoyándose en su funcionamiento e imitando sus dinámicas. El principio de equidad destaca la importancia de generar relaciones justas dentro del sistema agrícola y asegurar condiciones equitativas para las comunidades. Finalmente, el principio de cuidado promueve una gestión responsable que

proteja el ambiente y salvaguarde el bienestar de las generaciones actuales y futuras (Rahman *et al.*, 2024).

Abonos orgánicos

Los abonos orgánicos se originan a partir de procesos de descomposición y mineralización de residuos vegetales, animales e incluso industriales. Una vez incorporados al suelo, contribuyen a mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, ya que favorecen la infiltración y retención de agua, incrementan la actividad microbiana y regulan el pH, lo que los convierte en una fuente esencial de nutrientes para las plantas y para el propio suelo (Murillo-Montoya *et al.*, 2020). Dado que los residuos agrícolas representan un reservorio de materiales renovables, su reciclaje es prioritario dentro de los sistemas productivos. Los residuos de cultivos contienen altas proporciones de celulosa (40-50 %), hemicelulosa (15-25 %) y lignina (20-30 %), además de proteínas y azúcares solubles como glucosa y fructosa. Desde el punto de vista nutricional, constituyen una biomasa rica en carbono (40-45 %) y aportan nitrógeno (0.6-1 %), fósforo (0.45-2 %), potasio (14-23 %), diversos micronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal y su adición incrementa significativamente la capacidad de intercambio catiónico del suelo, ya que la acumulación de materia orgánica genera cargas negativas que contribuyen a este proceso (Fu *et al.*, 2021).

El conocimiento sobre el papel de la materia orgánica en la fertilidad del suelo es ancestral. Documentos romanos describen prácticas como el uso de estiércol animal, el encalado, el abono verde, la rotación de cultivos y el acolchado como estrategias claves para mejorar la productividad agrícola. En la actualidad, su importancia sigue siendo indiscutible, especialmente en suelos degradados o de baja fertilidad, debido a su capacidad para mantener una microbiota edáfica funcional y mejorar propiedades físicas y químicas fundamentales (Martinez *et al.*, 2024a).

Los fertilizantes orgánicos mejoran la calidad y el rendimiento de los cultivos, además de promover mejoras en la estructura, química y biología del suelo. También atenúan los efectos negativos de fertilizantes sintéticos con efecto

acidificante, como la urea, la cual altera el pH del suelo y afecta múltiples funciones químicas y biológicas. Adicionalmente, estas enmiendas generan condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos benéficos que participan en servicios ecosistémicos esenciales, como la descomposición de materia orgánica y la regulación de los ciclos del nitrógeno y el carbono (Akanmu *et al.*, 2023).

Las enmiendas de origen animal aportan nutrientes como carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), además de elementos traza como zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu) y hierro (Fe), lo que se refleja en mejoras en el crecimiento vegetal, el rendimiento y la calidad de los frutos (Bhunja *et al.*, 2021). El estiércol, en particular, constituye una fuente tradicional de fertilidad que ha permitido disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados. Estiércoles de aves, bovinos, ovinos y porcinos se emplean ampliamente para este fin (Chojnacka *et al.*, 2020; Durán-Lara *et al.*, 2020). Una revisión reciente señala que los beneficios del estiércol dependen de sus características intrínsecas, del tipo de suelo, las prácticas de manejo y las condiciones climáticas de cada región (Montgomery y Biklé, 2021).

Históricamente, antes de la disponibilidad de fertilizantes inorgánicos, el estiércol constituía la principal fuente de nutrientes, debido a su capacidad para elevar el contenido de materia orgánica y mejorar la estructura, química y biología del suelo (Goldan *et al.*, 2023). No obstante, la dosificación de fertilizantes orgánicos se basa frecuentemente en la demanda de nitrógeno, lo que puede dificultar su uso debido a los altos volúmenes requeridos en materiales como estiércoles o compost (Martinez *et al.*, 2024a).

Diversos estudios han evaluado el impacto de los abonos orgánicos. Por ejemplo, la aplicación de 25 t/ha de compost en suelos ácidos mejoró significativamente sus propiedades físicas y químicas, permitiendo reducir en un 40 % el uso de fertilizantes foliares sin afectar el rendimiento del cultivo, lo que evidencia su potencial para disminuir la dependencia de insumos químicos (Cahyono *et al.*, 2020).

Compost

El compostaje se define como un proceso controlado de transformación de residuos orgánicos biodegradables en un producto estable mediante la acción de microorganismos, principalmente bacterias, hongos y actinomicetos (Ayilara *et al.*, 2020). Este proceso consiste en la descomposición bio-oxidativa de la materia orgánica y permite la obtención de materiales de alta calidad con aplicaciones eficientes en la agricultura (Durán-Lara *et al.*, 2020). De manera específica, el compostaje es un proceso aeróbico que requiere la presencia de oxígeno, niveles adecuados de humedad y una porosidad suficiente para favorecer la actividad microbiana. Entre las variables clave de control se encuentran la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y el contenido de humedad. La descomposición y la humificación parcial de la materia orgánica se llevan a cabo gracias a procesos metabólicos complejos desarrollados por la comunidad microbiana responsable de la degradación (Sayara *et al.*, 2020).

El compost es el producto final de este proceso, resultante de la biodegradación microbiana de residuos orgánicos. Se caracteriza por ser un material estable, seguro para los cultivos y sin agentes contaminantes, además de desempeñar un papel fundamental en la mejora de las propiedades químicas, físicas y microbiológicas del suelo (Abebe *et al.*, 2022). Entre sus beneficios destacan el incremento en la infiltración y la capacidad de retención de agua, lo cual contribuye a la funcionalidad y resiliencia del suelo (Sayara *et al.*, 2020).

Etapas del compostaje

El proceso de compostaje se desarrolla mediante una serie de fases sucesivas caracterizadas por cambios en la actividad microbiana y en la temperatura del material orgánico.

Estas etapas permiten la degradación progresiva y la estabilización de los residuos:

- **Fase mesófila**

Corresponde al inicio del proceso, cuando microorganismos mesófilos (principalmente bacterias y hongos) degradan compuestos orgánicos simples

como azúcares, aminoácidos y proteínas. Durante esta etapa, la temperatura del material se incrementa rápidamente debido a la intensa actividad metabólica.

- Fase termófila

Ocurre cuando la temperatura del compost supera los 40 °C, alcanzando valores máximos que favorecen la descomposición acelerada de materiales más complejos. Esta fase es una de las más dinámicas del proceso, ya que promueve la desactivación de patógenos y la descomposición de lignocelulosa.

- Fase de enfriamiento

Posteriormente, la temperatura disminuye gradualmente como resultado de la reducción en la actividad microbiana. Los organismos mesófilos vuelven a predominar y continúan la degradación de compuestos parcialmente transformados durante la etapa termófila.

- Fase de maduración

Es la etapa final y más prolongada, orientada a la estabilización y humificación del material. Durante este periodo se obtiene un compost maduro, estable y de alta calidad, adecuado para su aplicación agrícola (Sayara *et al.*, 2020; Goldan *et al.*, 2023).

Los microorganismos que participan en el compostaje se clasifican principalmente con base en la temperatura a la que presentan su mayor actividad. Los organismos mesófilos se desarrollan en rangos de 20 a 40 °C, mientras que las bacterias termófilas prosperan entre 40 y 70 °C. Los primeros son responsables del inicio del proceso de compostaje, ya que degradan los compuestos más fácilmente descomponibles presentes en los residuos, generando un incremento rápido en la temperatura del material debido a su alta actividad metabólica (Ayilara *et al.*, 2020).

El volumen del residuo también puede influir en la temperatura alcanzada durante el proceso; volúmenes reducidos pueden impedir que se alcancen temperaturas elevadas. Sin embargo, incluso cuando la temperatura no sobrepasa los 45 °C, es posible que los patógenos sean eliminados debido al agotamiento de nutrientes y a la acción de microorganismos competitivos que liberan enzimas con capacidad para destruirlos (Ayilara *et al.*, 2020).

El contenido de humedad es otro factor determinante en la eficiencia del compostaje. Para mantener condiciones aeróbicas adecuadas, la humedad debe situarse entre 40 % y 60 %. Niveles superiores limitan la difusión de oxígeno y disminuyen la actividad microbiana, mientras que niveles demasiado bajos reducen la degradación. El tamaño de las partículas también afecta el proceso: partículas pequeñas incrementan la superficie disponible para la acción microbiana y aceleran la descomposición; no obstante, tamaños excesivamente reducidos pueden limitar el flujo de oxígeno y favorecer la retención de humedad, ralentizando así la compostaje (Ayilara *et al.*, 2020). Diversos factores adicionales influyen en el compostaje, incluyendo la disponibilidad de oxígeno, el contenido de humedad, la composición bioquímica del material orgánico, el pH y la temperatura. Todos estos elementos en conjunto determinan la eficiencia del proceso y la calidad del compost obtenido (Goldan *et al.*, 2023).

Estabilidad y madurez del compost

La madurez del compost es un indicador clave de su calidad agrícola, ya que los materiales completamente maduros contribuyen a incrementar la materia orgánica del suelo (MOS) de forma más eficiente que los abonos frescos o inmaduros, debido a su mayor contenido de carbono estable. La madurez se relaciona con la ausencia de compuestos fitotóxicos y con la aptitud del compost para favorecer el crecimiento vegetal, mientras que la estabilidad hace referencia a la resistencia de la materia orgánica a continuar degradándose por acción microbiana. Ambas características deben evaluarse de manera conjunta, ya que la presencia de sustancias fitotóxicas suele resultar de la actividad microbiana sobre materia orgánica aún inestable (Sayara *et al.*, 2020). Cuando el proceso de compostaje se desarrolla adecuadamente, los residuos orgánicos húmedos y olorosos se transforman en un material estable, seco, sin olores y apto para su reutilización. Además, el compost maduro permite suprimir malezas y patógenos, reducir olores, mejorar su manejo y garantizar un almacenamiento y transporte más seguros. Este grado de estabilización de la materia orgánica contribuye a

obtener un producto final de calidad elevada y funcionalidad agronómica comprobada (Goldan *et al.*, 2023).

Bocashi

El bocashi es un abono fermentado y su técnica es muy antigua originada en Japón, este abono contiene una mezcla de materias orgánicas de origen vegetal y/o animal (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013; Phooi *et al.*, 2022), además de otros sustratos que proporcionan los microorganismos que realizan la degradación de estos residuos orgánicos (Quiroz y Céspedes, 2019). La fermentación predominante en su elaboración es de tipo láctico, aunque también ocurren en menor proporción procesos fermentativos acético, alcohólico, propiónico y butírico (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013).

Entre las características más importantes de este abono, están relacionadas con el alto contenido de materia orgánica y nutrientes, además de presentar una alta porosidad y capacidad de retención de agua (Quiroz y Céspedes, 2019). Al poseer una cantidad equilibrada de macro y micronutrientes, su uso favorece la nutrición de las plantas (Mendivil-Lugo *et al.*, 2020), aunque su efecto varía en función de la naturaleza de los materiales a partir de los cuales se produce. Los nutrientes presentes en el bocashi se encuentran en forma de quelatos orgánicos, lo que reduce su pérdida por volatilización o lixiviación tras la aplicación (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013). Además, su uso favorece la incorporación de microorganismos benéficos al suelo, promoviendo procesos fermentativos en la biomasa existente y generando condiciones óptimas para la proliferación de la microbiota nativa. Esta incluye hongos, bacterias, actinomicetos, micorrizas y microorganismos fijadores de nitrógeno, los cuales desempeñan un papel central en la nutrición vegetal equilibrada y en la construcción de la salud del suelo (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013; Quiroz y Céspedes, 2019).

El bocashi generalmente se aplica en dosis relativamente bajas, entre 2 y 3 t ha⁻¹ y su uso se ha extendido tanto entre productores convencionales como entre agricultores ecológicos y aquellos en proceso de transición agroecológica, debido

a su potencial para incrementar la productividad y mejorar la calidad de los cultivos (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013).

Ingredientes de la receta original tipo bocashi según Quiroz y Céspedes (2019)

- Estiércol animal
- Carbón triturado
- Pulido, sémola o salvado de arroz
- Cáscaras de arroz o café, paja o residuos de cultivos de tamaño pequeño
- Cal dolomita, cal agrícola, ceniza o harina de roca
- Melaza, miel de caña o su jugo
- Levadura de pan
- Suelo tamizado (preferiblemente arcilloso)
- Agua

No existe un único tipo de bocashi, ya que su formulación debe ajustarse a las condiciones y disponibilidad de recursos de cada región (Pegorer de Siqueira y B. de Siqueira, 2013). Debido a ello, se han desarrollado múltiples recetas que sustituyen ingredientes de la fórmula original por materiales localmente accesibles, manteniendo los principios fermentativos del proceso. Estas variantes no sólo difieren en la composición de los insumos, sino también en la duración del proceso de elaboración, que puede recomendarse entre 7, 15, 18 o 21 días, dependiendo del diseño de la mezcla y de la dinámica de fermentación asociada (Quiroz y Céspedes, 2019).

Proceso de elaboración del bocashi

Según Quiroz y Céspedes (2019) el proceso inicia con la disposición, bajo techo, de los materiales sólidos en capas (como salvado, cáscara de arroz o residuos de cosecha, estiércol, carbón vegetal o ceniza) para luego mezclarlos y formar una pila homogénea. Posteriormente, se incorpora una fuente de carbono de fácil asimilación (por ejemplo, melaza) junto con una fuente de microorganismos, los cuales se diluyen previamente en agua y se aplican uniformemente sobre la mezcla. Una vez integrados todos los materiales, se ajusta el contenido de

humedad al 35-40 %. A partir de este momento, es indispensable monitorear la temperatura con un termómetro y evitar que supere los 70 °C; para ello, durante los primeros días es necesario realizar volteos frecuentes, los cuales pueden disminuir conforme avanza la fermentación. En esencia, el proceso es similar al compostaje, con la diferencia de que se incorpora un inóculo microbiano que acelera la degradación de los materiales y reduce el tiempo total de procesamiento.

El bocashi es también destaca por su capacidad para reciclar nutrientes provenientes de frutas, verduras, lácteos y carne dentro de la cadena de suministro de alimentos, funcionando como una alternativa eficiente para la valorización de residuos orgánicos (Phooi *et al.*, 2022). En este sentido, diversos estudios han documentado la utilización de residuos domésticos para su producción, convirtiéndolo en una estrategia viable para el reciclaje y para disminuir la contaminación asociada a los desechos orgánicos generados en el hogar (Lew *et al.*, 2021; Olle, 2021).

El uso de bocashi ha sido ampliamente investigado en distintos cultivos y sistemas de producción. Por ejemplo, se ha observado que su aplicación mejora la germinación de semillas de rábano, incrementa el vigor de las plántulas y promueve una mayor biomasa seca radicular (Mendivil-Lugo *et al.*, 2020). Resultados similares se han reportado en cultivos de lechuga, donde el bocashi favoreció características agronómicas clave (masa total, masa comercial y diámetro de cabeza), además de incrementar la biomasa microbiana del suelo y el carbono microbiano, junto con una reducción del CO₂ producido, lo cual reflejó una mejora notable en las condiciones biológicas del suelo (Hata *et al.*, 2020).

El bocashi en combinación con biofertilizantes aumentó los rendimientos en los cultivos de remolacha y repollo (Kruker *et al.*, 2023). Asimismo, su uso asociado con residuos orgánicos promovió mejoras en parámetros morfofisiológicos y nutricionales en plántulas de Copaiba (Boechat *et al.*, 2020). En la misma línea, la combinación de bocashi con diferentes residuos orgánicos favoreció el crecimiento de *Alibertia edulis* (Santos *et al.*, 2020). Para el cultivo de orégano, la aplicación del bocashi influyó positivamente en procesos fisiológicos como la

fotosíntesis, conductancia estomática, concentración interna de CO₂ y transpiración (Wenneck *et al.*, 2023).

El bocashi también puede complementarse con fertilización química tradicional. En un estudio con berenjena, la combinación de bocashi con fertilizante nitrogenado incrementó la altura de las plantas en un 57.5 % y el rendimiento total en un 43.15 % (Amalia *et al.*, 2020), lo que evidencia su compatibilidad con esquemas de fertilización integrada.

Además de sus efectos en el rendimiento, el bocashi ha sido evaluado como herramienta para restauración y mejoramiento del suelo. En un estudio durante siete años en un campo agrícola, la aplicación conjunta de compost y bocashi modificó los patrones de coexistencia de comunidades de bacterias y hongos, y mejoró diversas propiedades fisicoquímicas del suelo, demostrando así su potencial como enmienda para revitalizar suelos degradados (Luo *et al.*, 2022).

Temperatura y Unidades calor (UC)

La temperatura del aire influye directamente en la duración de los procesos fenológicos del café, afectando etapas como el tiempo desde la siembra hasta la primera floración, el inicio de la cosecha, el máximo desarrollo foliar y la curva de crecimiento del fruto (Ramírez-Builes *et al.*, 2013). El rango óptimo de temperatura para el cultivo se sitúa entre 18 y 21 °C; así, las plantaciones ubicadas en zonas más frías requieren más tiempo para expresar su potencial productivo, mientras que en ambientes más cálidos puede verse comprometido el llenado del fruto (Montoya y Jaramillo, 2016). Dentro de su rango térmico de adaptación, que va de 10 a 32 °C, el café necesita aproximadamente 3,250 °C acumulados para completar el desarrollo desde la siembra hasta la primera floración, y cerca de 2,500 °C adicionales desde esa floración hasta la cosecha, sumando un total aproximado de 5,750 °C para concluir el ciclo completo (Montoya y Jaramillo, 2016).

El crecimiento y desarrollo del cultivo dependen de la cantidad de calor acumulado por encima de su temperatura base, concepto conocido como

unidades calor. Esto implica que una planta alcanza una etapa fenológica cuando ha acumulado la cantidad necesaria de calor, independientemente del tiempo cronológico que tome lograrlo (Hernández, 1989). Las unidades calor se calculan como la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base del cultivo; su acumulación a lo largo de un periodo constituye las unidades calor totales requeridas para cada fase de desarrollo (Montoya y Jaramillo, 2016).

REFERENCIAS CITADAS

- Abarca-Vargas, R. y V. L. Petricevich 2021. "Importancia biológica de los compuestos fenólicos." *Inventio* 14: 33-38.
- Abebe, T. G., M. R. Tamtam, A. A. Abebe, K. A. Abtemariam, T. G. Shigut, Y. A. Dejen y E. G. Haile 2022. "Growing use and impacts of chemical fertilizers and assessing alternative organic fertilizer sources in Ethiopia." *Applied and Environmental Soil Science* 2022: 1-14.
- Akanmu, A. O., O. M. Olowe, A. T. Phiri, D. Nirere, A. J. Odebode, N. J. Karemera Umuhoza, M. D. Asemoloye y O. O. Babalola 2023. "Bioresources in organic farming: implications for sustainable agricultural systems." *Horticulturae* 9: 659.

- Amalia, L., R. Budiasih, E. R. Ria, R. W. Widodo y U. Kuswati 2020. "Fermented compost and N-fertilizer for enhancing the growth and productivity of purple eggplant on vertisols." *Open Agriculture* 5: 898-904.
- Atnafu, O., M. Kedir, E. Teshale y M. Nugusie 2021. "Effect of organic and inorganic fertilizers on agronomic growth and soil properties of coffee (*Coffea arabica* L.) at Jimma, Southwestern Ethiopia." *International Journal of Current Research and Academic Review* 91: 86-94.
- Ayilara, M. S., O. S. Olanrewaju, O. O. Babalola y O. Odeyemi 2020. "Waste management through composting: Challenges and potentials." *Sustainability* 12: 4456.
- Bajaj, D. y S. Ballal 2021. "A review on antioxidant activity of coffee and its additives." *Journal of Pharmaceutical Research International* 33: 77-85.
- Barrientos, M. E. (1990). Ecología del cafeto. El cultivo del cafeto en México. I. M. d. Café-Nestlé. Xalapa, Veracruz, México, Editorial La Fuente, S. A.: 27-32.
- Bastian, F., O. S. Hutabarat, A. Dirpan, F. Nainu, H. Harapan, T. B. Emran y J. Simal-Gandara 2021. "From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing." *Foods* 10: 2827.
- Bhunja, S., A. Bhowmik, R. Mallick y J. Mukherjee 2021. "Agronomic efficiency of animal-derived organic fertilizers and their effects on biology and fertility of soil: A review." *Agronomy* 11: 823.
- Boechat, C. L., A. S. d. S. Damasceno, C. B. Rocha, A. M. d. S. Arauco y H. F. Silva 2020. "Organic residues in the composition of substrates enriched with bokashi biofertilizer for the sustainable production of *Copaifera langsdorffii* seedlings." *CERNE* 26: 18-25.
- Brevik, E. C., L. Slaughter, B. R. Singh, J. J. Steffan, D. Collier, P. Barnhart y P. Pereira 2020. "Soil and human health: Current status and future needs." *Air, Soil and Water Research* 13: 1-23.
- Cahyono, P., S. Loekito, D. Wiharso, Afandi, A. Rahmat, N. Nishimura y M. Senge 2020. "Effects of compost on soil properties and yield of pineapple (*Ananas comusus* L. Merr.) on red acid soil, lampung, Indonesia." *International Journal of Geomate* 19: 33-39.
- Castillo, P. G., J. Contreras, C. Zamarripa, L. Méndez, M. Vázquez y M. Holguin 1994. "Tecnología para la producción de café en México." Folleto Técnico No. 8. INIFAP Veracruz, México: 90.

- Chaves-Ulate, E. C. y P. Esquivel-Rodríguez 2019. "Ácidos clorogénicos presentes en el café: capacidad antimicrobiana y antioxidante." *Agronomía Mesoamericana* 30: 299-311.
- Chemura, A. 2014. "The growth response of coffee (*Coffea arabica* L) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels." *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 3: 59.
- Chen, H., X. Liu, Q. Xiao, L. Wu, M. Cheng, H. Wang, X. Wang, D. Hu, Z. Sun y X. Ma 2024. "Optimizing split-reduced drip fertigation schemes of arabica coffee based on soil microcosms, bean yield, quality and flavor in dry-hot region of southwest China." *Scientia Horticulturae* 336: 113418.
- Chojnacka, K., K. Moustakas y A. Witek-Krowiak 2020. "Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy." *Bioresource Technology* 295: 122223.
- DaMatta, F. M., E. Rahn, P. Läderach, R. Ghini y J. C. Ramhalo 2019. "Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated?" *Climatic Change* 152: 167–178.
- Das, S., A. Chatterjee y T. K. Pal 2020. "Organic farming in India: A vision towards a healthy nation." *Food Quality and Safety* 4: 69-76.
- Durán-Lara, E. F., A. Valderrama y A. Marican 2020. "Natural Organic compounds for application in organic farming." *Agriculture* 10: 41.
- Eyinate, G. A., A. Mushunje y S. F. G. Yusuf 2021. "The willingness to consume organic food: a review." *Food and Agricultural Immunology* 32: 78-104.
- Fraç, M., E. S. Hannula, M. Belka, J. F. Salles y M. Jedryczka 2022. "Soil mycobiome in sustainable agriculture." *Frontiers in Microbiology* 13: 1-9.
- Fu, B., L. Chen, H. Huang, P. Qu y Z. Wei 2021. "Impacts of crop residues on soil health: a review." *Environmental Pollutants and Bioavailability* 33: 164-173.
- Goldan, E., V. Nedeff, N. Barsan, M. Culea, M. Panainte-Lehadus, E. Mosnegutu, C. Tomozei, D. Chitimus y O. Irimia 2023. "Assessment of manure compost used as soil amendment—A review." *Processes* 11: 1167.
- Gómez-Martínez, M. J. (2019). El café en México: diversidad de sistemas y de especies. Retrospectiva del café en Mesoamérica y Colombia: un análisis de casos. J. Mora-Delgado, M. J. Gómez-Martínez and P. Rodríguez-Rodríguez. Ibagué-Tolima, Universidad del Tolima: 7-45.
- Hata, F. T., F. A. Spagnuolo, M. T. d. Paulaa, A. A. Moreiraa, M. U. Venturaa, G. A. d. F. Fregonezic y A. L. M. d. Oliveiraa 2020. "Bokashi compost and

- biofertilizer increase lettuce agronomic variables in protected cultivation and indicates substrate microbiological changes." *Emirates Journal of Food and Agriculture* 32: 640-646.
- Hernández, M. E. 1989. "Influencia de la temperatura en las etapas fenológicas del café." *Investigaciones Geográficas* 1: 53-70.
- IICA (2019). Manual de producción sostenible de café en la República Dominicana, República Dominicana.
- INIFAP (2021a). La cafecultura en México y su problemática. El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción. R. Compiladores López-Morgado, G. Díaz-Padilla and A. Zamarripa-Colmenero. Veracruz, México, Libro Técnico Núm. 41: 3-27.
- INIFAP (2021b). Suelos y nutrición del cafeto. El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción. R. Compiladores López-Morgado, G. Díaz-Padilla and A. Zamarripa-Colmenero. Veracruz, México, Libro Técnico Núm. 41: 207-230.
- INIFAP (2021c). Potencial productivo del cultivo de café en México El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción. R. Compiladores López-Morgado, G. Díaz-Padilla and A. Zamarripa-Colmenero. Veracruz, México, Libro Técnico Núm. 41: 33-52.
- Jiang, Z., Y. Lou, X. Liu, W. Sun, H. Wang, J. Liang, J. Guo, N. Li y Q. Yang 2023. "Combined application of coffee husk compost and inorganic fertilizer to improve the soil ecological environment and photosynthetic characteristics of arabica coffee." *Agronomy* 13: 1212.
- Jones, K., N. E. Mugendi, K. Garnett y N. T. Girkin 2025. "Organic management in coffee: a systematic review of the environmental, economic and social benefits and trade-offs for farmers." *Agroecology and Sustainable Food Systems* 49: 1368-1402.
- Kruker, G., E. S. Guidi, J. M. d. S. d. Santos, Á. L. Mafra y J. A. d. Almeida 2023. "Quality of bokashi-type biofertilizer formulations and its application in the production of vegetables in an ecological system." *Horticulturae* 9: 1314.
- Kurniawati, A., G. Tóth, K. Ylivainio y Z. Toth 2023. "Opportunities and challenges of bio-based fertilizers utilization for improving soil health." *Organic Agriculture* 13: 335–350.
- Lazcano, C., X. Zhu-Barker y C. Decock 2021. "Effects of organic fertilizers on the soil microorganisms responsible for N₂O emissions: A review." *Microorganisms* 9: 983.

- León-Chilito, E. D., J. F. Casanova-Olaya, J. C. Corrales y C. Figueroa 2025. "Sustainabilitydriven fertilizer recommendersystem for coffee crops using casebased reasoning approach." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 8: 1445795.
- Lew, P. S., N. N. L. Nik Ibrahim, S. Kamarudin, N. M. Thamrin y M. F. Misnan 2021. "Optimization of bokashi-composting process using effective microorganisms-1 in smart composting bin." *Sensors* 21: 2847.
- Li, R., C.-H. Lee, Y.-T. Lin y C.-W. Liu 2020. "Chinese consumers' willingness to pay for organic foods: a conceptual review." *International Food and Agribusiness Management Review* 23: 173 - 188.
- Luo, Y., J. B. Gonzalez Lopez, H. P. J. van Veelen, V. Sechi, A. ter Heijne, T. M. Bezemer y C. J. N. Buisman 2022. "Bacterial and fungal co-occurrence patterns in agricultural soils amended with compost and bokashi." *Soil Biology and Biochemistry* 174: 108831.
- Martinez, H. E. P., S. A. L. d. Andrade, R. H. S. Santos, J. L. C. Baptistella y P. Mazzafera 2024a. "Agronomic practices toward coffee sustainability. a review." *Scientia Agricola* 81: e20220277.
- Martinez, H. E. P., d. A. S. A. L., R. H. S. Santos, J. L. C. Baptistella y P. Mazzafera 2024b. "Agronomic practices toward coffee sustainability. A review." *Scientia Agricola* 81: e20220277.
- Mendivil-Lugo, C., E. Nava-Pérez, A. D. Armenta-Bojórquez, R. D. Ruelas-Ayala y J. A. Félix-Herrán 2020. "Elaboración de un abono orgánico tipo bocashi y su evaluación en la germinación y crecimiento del rábano." *Biotechnia* 22: 17-23.
- Montgomery, D. R. y A. Biklé 2021. "Soil health and nutrient density: beyond organic vs. conventional farming." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 699147.
- Montoya, R. E. C. y R. A. Jaramillo 2016. "Efecto de la temperatura en la producción de café." *Cenicafé* 67: 58-65.
- Murillo-Montoya, S. A., A. Mendoza-Mora y C. J. Fadul-Vasquez 2020. "La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola." *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales* 7: 58-68.
- Naturland 2000. "Agricultura orgánica en el trópico y subtrópico: guías de 18 cultivos " Café Asociación Naturland. 1ª ed. Gräfelfing, Alemania: 21.







- Olle, M. 2021. "Review: Bokashi technology as a promising technology for crop production in Europe." *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 96: 145-152.
- Osorio, P. V. (2021). La calidad del Café. Guía más agronomía, más productividad, más calidad. Cenicafé. DOI:10.38141/cenbook-0014
- Pegorer de Siqueira, A. P. y M. F. B. de Siqueira 2013. "Bokashi adubo orgânico fermentado." Niterói: Programa rio rural Manual Técnico: 16 p.
- Phooi, C. L., E. A. Azman y R. Ismail 2022. "Role of organic manure Bokashi improving plant growth and nutrition: A review." *Sarhad Journal of Agriculture* 38: 1478-1484.
- Pulgarín, J. A. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. Sistemas de produccion de café de Colombia. Chinchiná. Colombia, Cenicafé: 21-60.
- Quiroz, M. y C. Céspedes 2019. "Bokashi as an amendment and source of nitrogen in sustainable agricultural systems: A review." *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19: 237-248.
- Rahman, A., P. Baharlouei, E. H. Y. Koh, D. G. Pirvu, R. Rehmani, M. Arcos y S. Puri 2024. "A comprehensive analysis of organic food: evaluating nutritional value and impact on human Health." *Foods* 13: 208.
- Ramírez-Builes, V. H., Á. Jaramillo-Robledo y J. Arcila-Pulgarín (2013). Factores climáticos que intervienen en la producción del café en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. *Cenicafé*. 1: 205–237.
- Ramírez, V. H. 2014. "La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones." Comité Editorial Cenicafé: 8 p.
- Ricci, M. d. S. F., J. R. Costa, A. N. Pinto y V. L. d. S. Santos 2006. "Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado." *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41: 569–575.
- Rojo, J. E. y U. H. Pérez 2014. "Café I (G. *Coffea*)." Reduca (Biología). Serie Botánica 7: 113-132.
- Rosas-Arellano, J., E. Escamilla-Prado y O. Ruiz-Rosado 2008. "Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico." *Terra Latinoamericana* 26: 375-384.
- Sadeghian-Khalajabadi, S., B. Mejía-Muñoz y J. Arcila-Pulgarín 2006. "Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia." *Cenicafé* 57: 251-261.

- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2008a. "Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia." *Cenicafé* Boletín técnico N°32 45 p.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. (2008b). Actualización y tendencia en la fertilización de café. En: Actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes. Bogotá, Sociedad colombiana de la ciencia del suelo: 41-57.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2010. "Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. Chinchiná." *Cenicafé* (Avances Técnicos No. 391): 8p.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. y H. González-Osorio 2012. "Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de levante. Chinchiná " *Cenicafé* (Avances Técnicos No. 423) 4 p.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2013. "Nutrición de cafetales. En federación nacional de cafeteros de Colombia. Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura " *Cenicafé* 2: 85-116.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2017. "Formulaciones de fertilizantes: Alternativas para una nutrición balanceada de los cafetales en Colombia (Avances técnicos No. 423)." *Cenicafé*: 4 p.
- SADER 2015. "México y el crecimiento del café orgánico." <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-y-el-crecimiento-del-cafe-organoico>: Fecha de consulta abril 2024.
- SADER 2018. "México, onceavo productor mundial de café." <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe?idiom=es>: Fecha de consulta abril 2024.
- SADER 2022. "Cultivo de café en México." [https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mexicana%20de%20caf%C3%A9,Puebla%20\(15.3%20por%20ciento\)](https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mexicana%20de%20caf%C3%A9,Puebla%20(15.3%20por%20ciento)) .Fecha de consulta abril 2024.
- Santos, C. C., M. d. C. Vieira, N. A. H. Zárate, T. d. O. Carnevali y W. V. Gonçalves 2020. "Organic residues and bokashi influence in the growth of *Alibertia edulis*." *Floresta E Ambiente* 27: e20171034.
- Sayara, T., R. Basheer-Salimia, F. Hawamde y A. Sánchez 2020. "Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture." *Agronomy* 10: 1838.
- SIAP 2023a. "Monografías de productos agroalimentarios mexicanos." https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/832760/cafe_cereza.pdf: Fecha de consulta abril 2024.

- SIAP 2023b. "Anuario estadístico de la producción agrícola." <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>: Fecha de consulta abril 2024.
- Unigarro, C. A. 2022. "Fenología y fisiología del fruto de café: Revisión y avances de investigación." *memorias seminario científico Cenicafé* 73: e73108.
- Velmourougane, K. 2016. "Impact of organic and conventional systems of coffee farming on soil properties and culturable microbial diversity." *Scientifica (Cairo)* 2016: 3604026.
- Wenneck, G. S., R. Saath, A. L. Moro, G. P. d. S. Carvalho, D. C. Santi y R. Rezende 2023. "Physiological responses of oregano under different water management and application of fermented bokashi compost." *Acta Scientiarum. Agronomy* 45: e60807.
- Zhao, Q., W. Xiong, Y. Xing, Y. Sun, X. Lin y Y. Dong 2018. "Long-Term coffee monoculture alters soil chemical properties and microbial communities." *Scientific Reports* 8: 6116.

Evaluación del uso de bocashi en la productividad y rentabilidad en el cultivo de café

Evaluation of the use of bocashi in productivity and profitability in coffee cultivation

Alicia García-Moreno¹ , Roberto Sánchez-Lucio² , José Luis Reyes-Carrillo^{3*} , José Luis García-Hernández⁴ , Urbano Nava-Camberos⁴ , Pedro Cano-Ríos³ 

¹Estudiante del Programa de Posgrado en Ciencias en Producción Agropecuaria, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna: Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera a Santa Fe, S/N, Valle Verde, CP. 27059. Torreón, Coahuila, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Santiago: Carretera Internacional México – Nogales km 6, Centro, CP. 63300. Santiago Ixcuintla, Nayarit, México.

³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna: Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera a Santa Fe, S/N, Valle Verde, CP. 27059. Torreón, Coahuila, México.

⁴Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia (FAZ): Carretera Gómez Palacio – Tlahualilo km 32, CP. 35170. Venecia, Durango, México.

*Autor de correspondencia: jlreyes54@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 9 de abril 2025

Aceptado: 29 de julio 2025

RESUMEN. La demanda de alimentos orgánicos aumenta a medida que los consumidores buscan alimentos que consideren más saludables y seguros, en consecuencia, diversas investigaciones se han realizado con diferentes alternativas de nutrición orgánica. El objetivo de esta investigación fue evaluar uso del bocashi en la productividad en el cultivo de café y determinar la rentabilidad de este abono cuando se aplica a diferentes dosis. El experimento se estableció en una plantación de cafetos criollos de tamaño estandarizado, bajo sombra regulada en terrenos con gran diversidad de árboles, follaje abundante, buen estado fitosanitario y edad de 25 años. Los tratamientos evaluados fueron tres dosis de bocashi (tres, seis y nueve kg árbol⁻¹), más un tratamiento sin abonar, dando un total de cuatro tratamientos, con cuatro repeticiones y cuatro árboles por repetición. Los tratamientos se evaluaron bajo un diseño de bloques al azar. Los resultados mostraron diferencia significativa en el rendimiento a medida que se incrementó la dosis de bocashi, alcanzando una diferencia de hasta 0.47 t ha⁻¹ respecto al testigo cuando se aplicaron 9 kg árbol⁻¹. Así mismo, el largo y ancho del fruto mejoraron significativamente en cada tratamiento. El análisis económico arrojó que únicamente la dosis de 3 kg árbol⁻¹ es rentable cuando el precio del café es de al menos \$19.14 kg⁻¹. El uso del bocashi aumentó el rendimiento y crecimiento del fruto de café, pero la rentabilidad de su uso es afectada por el precio del fruto en cada ciclo productivo y las dosis del abono.

Palabras clave: Abono fermentado, *Coffea arabica*, rendimiento, producción orgánica.

ABSTRACT. The demand for organic foods is increasing as consumers seek foods they consider healthier and safer. Consequently, various investigations have been conducted using different organic nutrition alternatives. The objective of this research was to evaluate the use of bocashi on productivity in coffee cultivation and to determine the profitability of this fertilizer when applied at different doses. The experiment was established on a plantation of standardized-sized native coffee tree trees, under regulated shade on land with a high diversity of trees, abundant foliage, good phytosanitary conditions, and an age of 25 years. The treatments evaluated were three doses of bocashi (three, six, and nine kg tree⁻¹) plus an unfertilized control treatment, for a total of four treatments, with four replicates, each replicate on four trees. The treatments were evaluated using a randomized block design. The results showed significant differences in yield as the bocashi dose increased, reaching a difference of up to 0.47 t ha⁻¹ compared to the control when 9 kg tree⁻¹ was applied. In addition, the fruit length and width also improved significantly in each treatment. The economic analysis showed that only the 3 kg tree⁻¹ dose is profitable when the coffee price is at least \$19.14 per kg⁻¹. The use of bocashi increased the yield and growth of coffee berries, but its profitability is affected by the price of the berries in each production cycle and the fertilizer doses.

Keywords: Fermented fertilizer, *Coffea arabica*, yield, organic production.

Como citar: García-Moreno A, Sánchez-Lucio R, Reyes-Carrillo JL, García-Hernández JL, Nava-Camberos U, Cano-Ríos P (2025) Evaluación del uso de bocashi en la productividad y rentabilidad en el cultivo de café. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 12(2): e4572. DOI: 10.19136/era.a12n2.4572.

INTRODUCCIÓN

El café es la bebida estimulante no alcohólica más comercializada del mundo (Gómez-Martínez 2019). Los principales productores de café a nivel mundial son Brasil, Colombia y Vietnam (SADER 2018), en tanto que México ocupa la onceava posición (SADER 2022). En el contexto de producción orgánica, México es el principal productor y exportador de café a nivel mundial (SIAP 2024), y produce café de gran calidad, siendo el estado de Chiapas el principal productor, aportando el 41% del volumen nacional, seguido por Veracruz con 24% y Puebla con 15.3% (SADER 2022).

El creciente interés por los alimentos cultivados de forma orgánica está ganando relevancia, en los países desarrollados y los países en desarrollo (Eyinade *et al.* 2021). El mercado de productos orgánicos es el mercado de más rápido crecimiento en el mundo (Das *et al.* 2020), pero solo alrededor del 1% de la superficie agrícola a nivel mundial, está destinada a la agricultura orgánica (Abebe *et al.* 2022). La agricultura orgánica es un sistema de gestión de la producción ecológica que promueve y mejora la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo (Das *et al.* 2020). Para mantener la salud del suelo en estos sistemas, se prioriza el uso de fertilizantes orgánicos, que son fuentes renovables, de bajo costo y representan una alternativa viable a los fertilizantes sintéticos, estos fertilizantes pueden ser de origen vegetal o animal (Abebe *et al.* 2022).

Los abonos orgánicos son productos derivados de procesos de descomposición y mineralización de residuos de origen vegetal, animal o industrial, los cuales, al ser aplicados al suelo, contribuyen a mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Murillo-Montoya *et al.* 2020). El bocashi es un abono fermentado elaborado a partir de una mezcla equilibrada de materias orgánicas de origen vegetal y/o animal (Pegorer-de-Siqueira y De-Siqueira 2013). Los principales ingredientes utilizados en la elaboración del bocashi incluyen estiércol animal, carbón triturado, salvado, residuos de cosecha, cal, melaza, levadura, suelo tamizado y agua (Quiroz y Céspedes 2019). Este abono orgánico se caracteriza por su alto contenido de macro y micronutrientes, lo que contribuye de forma significativa a la nutrición y al desarrollo de las plantas (Mendivil-Lugo *et al.* 2020). Además, la aplicación de bocashi favorece la incorporación de microorganismos benéficos al suelo, los cuales participan en la fermentación de la biomasa y estimulan la multiplicación y la actividad de la microbiota nativa del suelo (Pegorer-de-Siqueira y De-Siqueira 2013, Quiroz y Céspedes 2019). Diversos estudios han documentado que el uso de bocashi mejora la germinación de semillas de rábano (Mendivil-Lugo *et al.* 2020), incrementa el rendimiento en lechuga (Hata *et al.* 2020), remolacha y repollo (Kruker *et al.* 2023), favorece las respuestas fisiológicas del orégano (Santos *et al.* 2020) y aumenta la altura y el rendimiento en berenjena (Amalia *et al.* 2020).

En el manejo orgánico del café se deben considerar tanto la fuente de nutrientes como la eficiencia de su uso por parte de las plantas. Uno de los obstáculos críticos para una nutrición adecuada es la alta demanda de nitrógeno (N), entre 2.5 y 20.0 t ha⁻¹ de materia seca, dependiendo de la fuente. Las dosis aplicadas son elevadas ya que los abonos orgánicos generalmente tienen baja concentración de N y en el caso del manejo convencional de café una fracción de aproximadamente el 31.2% del N aplicado como urea se pierde por volatilización en los cafetales (Martínez *et al.* 2024).

En el cultivo del café, la temperatura del aire es un factor determinante en la duración de los procesos fenológicos, como el tiempo que transcurre desde la siembra hasta la primera floración,

la primera cosecha, al máximo desarrollo foliar y la curva de desarrollo del fruto de café (Ramírez-Builes *et al.* 2013). La temperatura óptima para el desarrollo del cafeto se encuentra entre 18 y 21°C (Montoya y Jaramillo 2016). El crecimiento y desarrollo de los cultivos está relacionado con la cantidad de calor que acumulan por encima de su temperatura base, lo que se conoce como unidades calor; esto implica que una etapa fenológica determinada se alcanza cuando se acumula una cantidad específica de calor, independientemente del tiempo cronológico requerido (Hernández 1989). Las unidades calor se define como la diferencia entre la temperatura media del día y la temperatura base del cultivo, y su sumatoria a lo largo de un periodo representa las unidades calor acumuladas (Montoya y Jaramillo 2016).

Existe pocos estudios sobre el efecto del bocashi en la producción de café, además que en la mayoría de los casos se omite la evaluación de la rentabilidad, no solo en este insumo sino de otros abonos orgánicos. Es necesario conocer la respuesta que tienen diferentes dosis de bocashi sobre las variables de productividad del café y determinar cuál de ellas puede ser la opción rentable para implementar. Por lo tanto, las variables de productividad evaluadas en el cultivo de café se incrementarán a medida que se aumenten las dosis de bocashi. Además, la rentabilidad en el uso de este abono se verá afectada por el precio del fruto en cada ciclo productivo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso de bocashi y determinar su efecto en variables de productividad en el cultivo de café, además de evaluar la rentabilidad cuando se aplica a diferentes dosis.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en la huerta Las Iguanas, Acatan de las Piñas, Municipio de Santiago Ixcuintla, Nayarit, México (20° 52' 08" LN, 104° 57' 59" LO), con una altitud 468 msnm. La precipitación anual promedio en el sitio experimental es de 1 430.6 mm y temperatura media anual de 31.7 °C. La huerta cuenta con una superficie de 3.4 ha con una densidad de plantación de 1 100 árboles ha⁻¹ de café orgánico en un sistema agroforestal.

Para el establecimiento del experimento se utilizó una plantación de cafetos criollos de la especie *arabica*, bajo sombra regulada en terrenos con gran diversidad de árboles, cafetos de tamaño estandarizado, follaje abundante, buen estado fitosanitario y edad de 25 años. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; cada tratamiento consistió en cuatro árboles y se consideró la pendiente como el factor de variación. Los tratamientos evaluados fueron tres dosis de bocashi (3, 6 y 9 kg árbol⁻¹), más un testigo sin abonar, dando un total de cuatro tratamientos.

La fecha de aplicación del abono fue el día 7 de junio de 2023, cinco días antes del inicio de la floración (12 de junio). El bocashi se aplicó en la base del tallo, en forma circular se realizó una pequeña zanja para evitar pérdidas del abono en caso de lluvia. La elaboración del bocashi se llevó a cabo de acuerdo con lo recomendado por el INIFAP (2023).

Variables evaluadas

Durante el desarrollo del experimento se evaluaron las siguientes variables: el ancho y largo del fruto (mm) se midió con un vernier marca TRUPER®, de septiembre a diciembre, los días 13 de

cada mes, para luego correlacionar el crecimiento con las unidades calor (UC) y determinar el rendimiento en kg ha⁻¹. En cosecha se determinó el rendimiento de café cereza (fruto con color), en tres diferentes fechas (18 de diciembre, 15 de enero y 12 de febrero), debido a que no todos los frutos maduran al mismo tiempo. En cada fecha de cosecha se pesaron los frutos en una báscula digital marca Aquila® modelo BA3100 con capacidad de 10 kilogramos. Para luego sumar el rendimiento en cada fecha y obtener el rendimiento total por cada árbol.

Unidades Calor

Las UC se calcularon por el método residual de acuerdo con Hernández (1989), de la siguiente manera:

$$UC = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} - T_{\text{base}}$$

Donde: UC = unidades calor, T_{máx} = temperatura máxima, T_{mín} = temperatura mínima y T_{base} = temperatura base.

Para la temperatura base se consideró 8 °C según reporta la literatura. Para el cálculo de las UC se utilizó una base datos de temperaturas correspondiente al periodo de estudio, proporcionada por el INIFAP campo experimental Santiago, ubicado en Santiago Ixcuintla Nayarit.

Análisis económico

El análisis económico se realizó de acuerdo con la metodología del CIMMYT conocida como presupuesto parcial (CIMMYT 1998), que consiste en analizar y comparar los conceptos de costos e ingresos que difieren entre los tratamientos, para ello se calcularon el ingreso marginal (Img) y el costo marginal (Cmg).

El Cmg se define como el incremento en el costo total atribuible al tratamiento alternativo (costo de aplicación de bocashi por hectárea considerando cada una de las dosis). Esto se refiere al incremento en el costo por hectárea al pasar del tratamiento testigo al de 3 kg ha⁻¹ de bocashi; luego del de 3 kg ha⁻¹ al de 6 kg ha⁻¹ y finalmente del de 6 kg ha⁻¹ al de 9 kg ha⁻¹. Conforme se incrementa la dosis el costo total se incrementa, y el término marginal se refiere al incremento en el costo de un tratamiento a otro. Mientras que el ingreso marginal (Img) se define como el ingreso adicional atribuible al tratamiento alternativo (ingreso obtenido del aumento de producción al aplicar bocashi). Esto es, que al incrementar la dosis del abono se incrementa la producción de café y con ello el ingreso total. El término "marginal" se refiere al incremento en el ingreso total de un tratamiento a otro. Por la Ley de los rendimientos decrecientes llega un momento en que ya no es costable incrementar el uso de insumos porque el costo es mayor que el ingreso.

Si el ingreso marginal es mayor que el costo marginal (Img > cmg) para un determinado tratamiento, entonces se acepta el cambio tecnológico o, en este caso, se podría concluir que el uso de bocashi es rentable. El Img se calcula de la siguiente manera:

$$Img = Pmg \times Pr$$

Donde: Img = Ingreso marginal \$ ha⁻¹, Pr = precio del producto \$ kg⁻¹ y Pmg = producto marginal (t ha⁻¹). El Pmg es la cantidad adicional de café comercial (t ha⁻¹) en que supera al tratamiento previo. Por ejemplo, cantidad de producción de café en que supera el tratamiento de 3 kg ha⁻¹ al testigo;

luego cantidad de café en que supera el tratamiento de 6 kg ha⁻¹ al de 3 kg ha⁻¹ y así sucesivamente. Para el análisis de viabilidad el Img se calculó bajo tres escenarios de precios de mercado del café: \$6.73 kg⁻¹, \$22 kg⁻¹ y \$25 kg⁻¹. Los valores de Pmg multiplicados por el precio del producto da como resultado el Img. Finalmente, los valores de Img se comparan con los de Cmg para la toma de decisiones. Si el ingreso marginal es mayor que el costo marginal (Img>Cmg) el tratamiento se acepta porque el ingreso que genera ese tratamiento es mayor que su costo.

Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de regresión múltiple para describir el crecimiento del fruto de café en función de la fecha de muestreo, expresada en UC acumuladas a partir del inicio de floración, y la dosis de bocashi aplicada (kg árbol⁻¹). El modelo empleado fue:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

Donde: y = variable dependiente, largo y ancho del fruto (mm), b₀ = intercepto, b₁ y b₂ = coeficientes de regresión, x₁ = variable independiente, UC, x₂ = variable independiente, dosis de bocashi (kg árbol⁻¹). Los criterios para determinar la existencia de una relación lineal significativa entre las variables predictoras y de respuesta fueron los valores de $P > F \leq 0.05$ (modelo completo), de $P > t \leq 0.05$ (cada variable independiente) y del coeficiente de determinación ($r^2 \geq 0.80$).

Previamente se realizaron pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas en el programa SAS. Se encontró que los errores se comportan de forma normal, ya que la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk arrojó un valor de $P = 0.1151$ para las variables largo y ancho y de $P = 0.2300$ para la variable rendimiento. Se utilizó la prueba de Bartlett para la homogeneidad de varianzas obteniéndose los siguientes valores: largo $P = 0.0334$, ancho $P = 0.0635$ y rendimiento $P = 0.0158$. Los datos de crecimiento de fruto (largo y ancho) y rendimiento fueron sometidos a análisis de varianza (PROC ANOVA). Las comparaciones de medias de tratamientos se realizaron con la prueba de DMS ($P = 0.05$). El paquete estadístico utilizado fue SAS versión 9.0 (SAS 2002).

RESULTADOS

Crecimiento del fruto

En la Tabla 1 se puede observar que a medida que se incrementa la dosis de bocashi hay un aumento en el largo del fruto. A mayor acumulación de UC mayor desarrollo del fruto. En el efecto de la interacción UC*dosis, se encontró que conforme aumenta la dosis de bocashi y las UC, se observa un mayor largo de fruto (tamaño). El mayor tamaño de fruto en cuanto a su longitud se obtuvo a las 3 040.6 UC y en las dosis de 6 y 9 kg árbol⁻¹ (18.92 y 19.06, respectivamente).

En la Tabla 2 se puede observar que conforme se incrementa la dosis de bocashi aumenta el ancho del fruto. También, a mayor acumulación de UC mayor desarrollo es el desarrollo del fruto. En el efecto de la interacción UC*dosis, se encontró que a medida que aumenta la dosis de bocashi y las UC, mayor es el ancho de fruto (tamaño). El mayor tamaño de fruto en cuanto al ancho se obtuvo a las 3 040.6 UC y en las dosis de 6 y 9 kg árbol⁻¹ (16.70 y 17.09, respectivamente).

Tabla 1. Largo del fruto de café en función de las UC y dosis de bocashi (mm).

UC	Dosis (kg)				Promedio
	0	3	6	9	
1694.4	13.17(0.05) ^r	15.21(0.07) ⁿ	16.46(0.17) ^{lk}	16.71(0.17) ^{jk}	15.39 ^g
1942.6	13.41(0.06) ^r	15.48(0.08) ^{nm}	16.86(0.17) ^{ji}	17.04(0.15) ^{hi}	15.70 ^f
2177.1	13.45(0.04) ^r	15.67(0.06) ^m	17.19(0.05) ^{hg}	17.38(0.15) ^{gf}	15.93 ^e
2400.5	13.84(0.11) ^q	16.31(0.05) ^l	17.44(0.07) ^{egf}	17.72(0.16) ^{ed}	16.33 ^d
2631.7	14.02(0.14) ^q	16.73 ^{ji} (0.06) ^k	17.76(0.08) ^d	18.27(0.07) ^{cb}	16.70 ^c
2916.0	14.36(0.19) ^p	17.57(0.09) ^{edf}	18.20(0.04) ^c	18.56(0.07) ^b	17.17 ^b
3040.6	14.75(0.21) ^o	18.23(0.05) ^c	18.92(0.03) ^a	19.06(0.04) ^a	17.75 ^a
Promedio	13.86 ^d	16.46 ^c	17.54 ^b	17.82 ^a	

Letras distintas entre filas y columnas, indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$). Letras distintas entre promedios indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$). Valores entre paréntesis indican errores estándar. UC = unidades calor.

Tabla 2. Ancho del fruto de café en función de las UC y dosis de bocashi (mm).

UC	Dosis (kg)				Promedio
	0	3	6	9	
1694.4	9.52(0.09) ^v	11.25(0.03) ^q	13.2(0.25) ⁿ	14.47(0.013) ^{kl}	12.12 ^g
1942.6	9.83 ^u (0.07) ^v	11.44(0.02) ^q	14.16(0.19) ^{ml}	14.80(0.16) ^{kj}	12.56 ^f
2177.1	10.06(0.08) ^{ut}	11.79(0.03) ^p	14.90(0.17) ^j	15.25(0.18) ^{ih}	13.00 ^e
2400.5	10.32(0.06) st	12.42(0.07) ^o	15.44(0.16) ^{gh}	15.65(0.06) ^{gf}	13.36 ^d
2631.7	10.55(0.07) ^{sr}	13.22(0.12) ⁿ	15.88(0.11) ^{ef}	16.16(0.07) ^{ed}	13.96 ^c
2916.0	10.81(0.09) ^r	13.88(0.14) ^m	16.28(0.11) ^{cd}	16.51(0.08) ^{cb}	14.37 ^b
3040.6	11.17(0.10) ^q	15.03(0.09) ^{ji}	16.70(0.07) ^b	17.09(0.15) ^a	15.00 ^a
Promedio	10.33 ^d	12.72 ^c	15.22 ^b	15.71 ^a	

Letras distintas entre filas y columnas, indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$). Letras distintas entre promedios indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$). Valores entre paréntesis indican errores estándar. UC = unidades calor.

Unidades Calor

En la presente investigación, la acumulación de UC comenzó al inicio de la floración (12 de junio de 2023), con un valor de 18.4 y se registró un total acumulado de 3 213.2 UC al inicio de la cosecha (18 de diciembre de 2023). Las Figuras 1 y 2 muestran la dinámica de crecimiento del fruto del café. Se puede observar que el largo y ancho del fruto se incrementan a medida que aumentan las UC y la dosis de bocashi aplicada.

La ecuación de regresión obtenida para predecir el largo de fruto (y) en función de la acumulación de UC (x_1) y la dosis de bocashi (x_2) fue: $y = 10.4873 + 0.00167x_1 + 0.4326x_2$, la cual muestra una relación altamente significativa entre las variables ($P < 0.0001$) y una capacidad predictiva alta, ya que el 85% de la variabilidad en la longitud del fruto puede ser explicada por las UC y dosis de bocashi ($r^2 = 0.85$). La ecuación de regresión obtenida para estimar el ancho de fruto (y) fue $y =$

$5.8026 + 0.0020x_1 + 0.6216x_2$, mostrando también una relación altamente significativa entre las variables ($P < 0.0001$) y una capacidad predictiva alta ($r^2 = 0.92$).

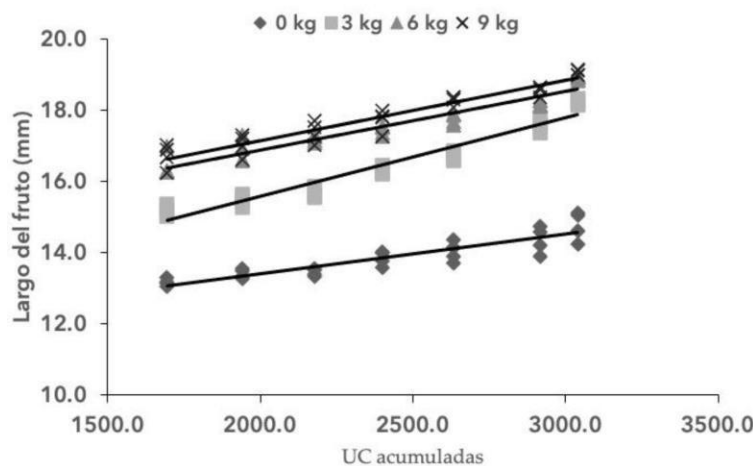


Figura 1. Relaciones entre la acumulación de UC y el largo del fruto en diferentes dosis de bocashi aplicadas en el cultivo de café.

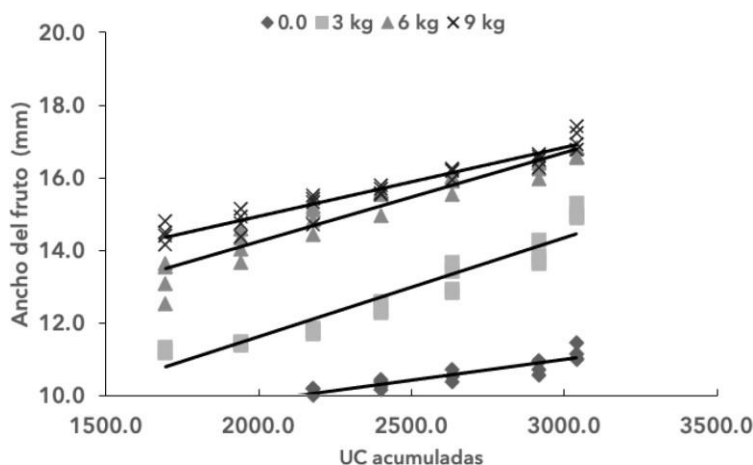


Figura 2. Relaciones entre la acumulación de UC y el ancho del fruto en diferentes dosis de bocashi aplicadas en el cultivo de café.

La ecuación de regresión obtenida para predecir el largo de fruto (y) en función de la acumulación de UC (x_1) y la dosis de bocashi (x_2) fue: $y = 10.4873 + 0.00167x_1 + 0.4326x_2$, la cual muestra una relación altamente significativa entre las variables ($P < 0.0001$) y una capacidad predictiva alta, ya que el 85% de la variabilidad en la longitud del fruto puede ser explicada por las UC y dosis de bocashi ($r^2 = 0.85$). La ecuación de regresión obtenida para estimar el ancho de fruto (y) fue: $y = 5.8026 + 0.0020x_1 + 0.6216x_2$, mostrando también una relación altamente significativa entre las variables ($P < 0.0001$) y una capacidad predictiva alta ($r^2 = 0.92$).

Rendimiento de café cereza

El análisis de varianza para la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$) detectó diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. En la Figura 3 se puede observar que los árboles sin abonar

presentaron los rendimientos más bajos (0.90 t ha^{-1}), mientras que la dosis de 3 kg árbol^{-1} fue superior y diferente estadísticamente del tratamiento sin bocashi (1.25 t ha^{-1}). El tratamiento con la dosis de 9 kg árbol^{-1} fue el que obtuvo mayor rendimiento (1.37 t ha^{-1}), aunque no fue estadísticamente diferente del tratamiento con la dosis de 6 kg árbol^{-1} (1.35 t ha^{-1}).

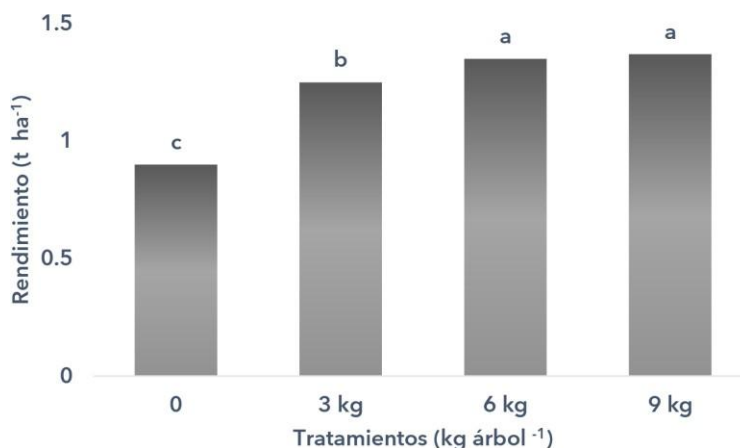


Figura 3. Efecto de diferentes dosis de bocashi sobre el rendimiento del café. Letras diferentes indican diferencias significativas (DMS, $P > 0.05$)

Análisis económico

En la Tabla 3 se muestra el costo total por hectárea del uso del bocashi al utilizar tres, seis y nueve kilogramos árbol⁻¹. El Costo del bocashi por hectárea por tratamiento se basó en la dosis de bocashi por árbol, la densidad de árboles por hectárea y el costo unitario del bocashi que fue de $\$2.03 \text{ kg}^{-1}$. El incremento en costo total por el uso del bocashi se incrementó en $\$6\,699$ entre tratamientos. Este costo adicional al incrementar el uso del insumo de un tratamiento a otro se conoce como costo marginal. En este caso el costo marginal de tratamiento a tratamiento fue de $\$6\,699$ (Tabla 3).

Tabla 3. Costo marginal (Cmg) al utilizar tres, seis y nueve kilogramos de bocashi árbol en el cultivo de café

Dosis bocashi (kg árbol ⁻¹)	Densidad de plantación (ha ⁻¹)	Kg bocashi • ha ⁻¹	Costo (\$) del kg de bocashi	Costo (\$) marginal*ha ⁻¹
0	1 100	0	\$ -	\$ -
3	1 100	3 300	\$ 2.03	\$ 6 699
6	1 100	6 600	\$ 2.03	\$ 6 699
9	1 100	9 900	\$ 2.03	\$ 6 699

En la Tabla 4 se muestra el análisis de viabilidad económica donde se presentan las estimaciones de Cmg e Img para los diferentes tratamientos bajo tres diferentes niveles de precios de mercado del kilogramo de café cereza: $\$6.73$, $\$22.00$ y $\$25.00$.

Para el cálculo del Ingreso marginal se usaron tres niveles de precio del café y el producto marginal de cada tratamiento. Se utilizó el precio de café de $\$6.73$ por kilogramo que fue el precio promedio de café cereza en el 2023, el precio máximo histórico registrado en enero 2025 de $\$22$ pesos por kilogramo de café cereza y un precio de $\$25$ pesos para incluir un precio más en el análisis de sensibilidad. El Pmg del tratamiento 0 kg por árbol a 3 kg por árbol es de $1.25 - 0.9 = 0.35 \text{ ton ha}^{-1}$. El

Pmg del tratamiento 3 kg por árbol a 6 kg por árbol fue de $1.35 - 1.25 = 0.10 \text{ ton ha}^{-1}$, finalmente el Pmg del tratamiento 6 kg por árbol a 9 kg por árbol fue de $1.37 - 1.35 = 0.02 \text{ ton ha}^{-1}$.

Tabla 4. Análisis de viabilidad económica al utilizar diferentes tratamientos de bocashi en el cultivo del café bajo diferentes niveles de precios del café cereza.

Dosis de bocashi (kg árbol ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Ingreso marginal (Pmg x Precio)	Img (\$/ha)	Cmg (\$ ha ⁻¹)	Decisión
0	0.9	-	-	-	
3	1.25	$0.35 \times \$6.73$	2 355.5	6 699.00	Img<Cmg
6	1.35	$0.10 \times \$6.73$	673.0	6 699.00	Img<Cmg
9	1.37	$0.02 \times \$6.73$	134.6	6 699.00	Img<Cmg
0	0.9	-	-	-	
3	1.25	$0.35 \times \$22.00$	7700	6 699.00	Img>Cmg
6	1.35	$0.10 \times \$22.00$	2200	6 699.00	Img<Cmg
9	1.37	$0.02 \times \$22.00$	440	6 699.00	Img<Cmg
0	0.9	-	-	-	
3	1.25	$0.35 \times \$25.00$	8750	6 699.00	Img>Cmg
6	1.35	$0.10 \times \$25.00$	2500	6 699.00	Img<Cmg
9	1.37	$0.02 \times \$25.00$	500	6 699.00	Img<Cmg

Los resultados indicaron que cuando el precio del café es de \$6.73 por kilogramo ningún tratamiento es costeable, es decir, no conviene aplicar el fertilizante orgánico bocashi porque con el aumento de la producción no se paga el costo. En otras palabras, el ingreso marginal es menor que el costo marginal (Img<Cmg). Cuando los precios son de \$22 pesos por kilogramo y de \$25 pesos por kilogramo solo el tratamiento de 3 kg árbol⁻¹ es costeable ya que el ingreso marginal es mayor que el costo marginal. Para los tratamientos de 6 kg árbol⁻¹ y 9 kg árbol⁻¹ ni con precios de \$22 y de \$25 pesos por kilogramo son costeables ya que los incrementos en rendimientos son insuficientes para cubrir el costo del insumo.

Para saber a partir de cual precio era costeable producir con el tratamiento de bocashi de 3 kg árbol⁻¹. Esto es el precio que iguala el Img con el Cmg (Img=Cmg) o precio de equilibrio, el cual fue de \$19.14 por kilogramo. A partir de ese precio, con el tratamiento de 3 kg árbol⁻¹, es costeable usar bocashi. Por debajo de él no es costeable con ningún tratamiento.

DISCUSIÓN

Crecimiento del fruto (mm)

En una evaluación de diferentes estrategias de nutrición orgánica e inorgánica en el cultivo de café, con plantas de 2.5 años, se encontró hasta 17.36 mm de ancho y 18.03 mm de largo del fruto (Alvarez-Lino *et al.* 2023), en el presente estudio los resultados obtenidos fueron de 15.71 mm de ancho y 17.82 mm de largo. Dicho resultado puede estar influenciado por la edad de las plantas estudiadas (25 años), al respecto Pulgarín (2007), reporta que el ciclo de vida de los árboles de café en condiciones comerciales alcanza hasta 25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo, y su máxima productividad es entre los 6 y 8 años. Después de este tiempo las plantas

pueden seguir su actividad por muchos años, pero con niveles de productividad bajos. Al respecto, Muñoz-Rocha *et al.* (2025) al evaluar plantas de higueras tratadas con bocashi, encontraron un aumento en el diámetro de tallo y la biomasa seca de la planta cuando se abona con 10 kg de bocashi por árbol. La adición de bocashi al medio de cultivo puede mejorar la calidad de las plantas, así como las características agronómicas y fisiológicas y una mayor absorción de nutrientes y agua, la cual puede estar determinada por la presencia de bacterias beneficiosas en el bocashi (Prisa 2020).

En el cultivo de café, Gómez-Velasco *et al.* (2014) reportan que los tratamientos con aplicación de bocashi aumentaron el crecimiento de la planta, el peso fresco de los brotes aumentó hasta 10 veces cuando se aplicó de bocashi, además el uso de abono fermentado estimula el grosor de tallo y la concentración de nitrógeno, fósforo y calcio (Cruz *et al.* 2020).

Unidades calor

El cultivo de café necesita aproximadamente 2 500 UC acumulados entre la primera floración y la cosecha (Montoya y Jaramillo 2016). En la presente investigación se encontró que los frutos de café alcanzaron su madurez a los 190 días después de la floración con un acumulado de 3 213.2 UC, lo cual coincide con Alvarez-Lino *et al.* (2023) quienes reportaron que la madurez de los frutos se alcanzó a los 240 días con un total de 3 071.1 UC. La diferencia entre la cantidad de días de la floración a la cosecha se debe a que el cultivo alcanza determinada etapa fenológica cuando hay cierta cantidad de calor, independientemente del tiempo requerido, además que solo existe una temperatura basal durante toda la vida de la planta y responde a aumentos de la temperatura en una forma lineal (Hernández 1989). Los resultados de la presente investigación concuerdan con lo citado anteriormente, ya que el crecimiento del fruto de café mostró una tendencia lineal a lo largo del tiempo y a medida que incrementaban las unidades calor. De acuerdo con las ecuaciones de regresión obtenidas el ajuste lineal para todos los tratamientos fue aceptable (González-González 2008) ya que el R^2 para el largo del fruto fue 0.86 y para el ancho fue de 0.92 (Figura 2 y 3).

Rendimiento

Se reporta que el uso de un abono líquido fermentado al 4% más inoculantes micorrizicos, influyó de forma positiva en el rendimiento del cultivo de café y superó al manejo convencional en 24.8 y 44.6% (Montes-Rojas y Anaya-Flórez 2019). También en evaluaciones de 20 variedades de café bajo manejo orgánico durante cuatro años con aplicaciones de composta y lombricomposta, se reportaron diferencias en el rendimiento entre las variedades (López-García *et al.* 2021). Lo que concuerda con las diferencias estadísticas favorables encontradas en el rendimiento cuando se utiliza bocashi a en contraste a las plantas sin tratar, alcanzando hasta una diferencia de 0.47 t ha⁻¹ con la dosis máxima de 9 kg árbol⁻¹. También en el cultivo de pimiento se compararon plantas sin tratar y con aplicación de bocashi, se lograron incrementos de hasta el 43% respecto al tratamiento sin tratar (Boudet-Antomarchi *et al.* 2015). Así mismo, en el cultivo de tomate abonado con bocashi se incrementaron los rendimientos hasta en un 30.5% comparado al tratamiento sin aplicación (Boudet-Antomarchi *et al.* 2017). En el presente estudio se obtuvieron incrementos de un 38.8, 50.0 y 52.2% cuando se utilizaron las dosis de 3, 6 y 9 kg de bocashi por árbol, respectivamente. También, en un estudio realizado en *Moringa oleifera* utilizando bocashi, se encontró, que el número total de frutos por planta se aumentó significativamente en un 75% más que el tratamiento sin tratar (Mota-Fernández *et al.* 2019). En el cultivo de higuera al utilizar una dosis de bocashi de 10 kg por árbol,

se encontró que aumentó el rendimiento hasta un 110% más que los árboles que no son tratados con dicho abono utilizando de 500 a 1 050 kg por árbol (Muñoz-Rocha *et al.* 2025).

Se han realizado diversos estudios en diferentes cultivos utilizando bocashi en combinación con fertilización química (López-Tolentino *et al.* 2023), así como también en combinación con biofertilizantes los cuales aumentan el rendimiento (Kruker *et al.* 2023).

De acuerdo con los resultados de este estudio, el rendimiento sin aplicar bocashi fue de 0.9 t ha⁻¹ y el rendimiento máximo de 1.37 t ha⁻¹ al utilizar 9 kilogramos bocashi árbol⁻¹, el cual supera al rendimiento promedio del estado de Nayarit de 1.08 t ha⁻¹. La producción promedio nacional de café en 2023 fue 1.62 t ha⁻¹ (SIAP 2024a). Factores como la edad de las plantas y la densidad de siembra pueden intervenir con el rendimiento total del cultivo. En esta investigación se utilizaron árboles con una edad de 25 años y con una densidad de siembra de 1 100 árboles ha⁻¹. De acuerdo con Pulgarín (2007), el ciclo de vida de los árboles de café en condiciones comerciales alcanza hasta 25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo, y su máxima productividad es entre los 6 y 8 años. Es necesario realizar investigación del uso del bocashi bajo diferentes densidades de siembra y con la edad máxima de productividad en el cultivo de café. En una evaluación de diferentes estrategias de nutrición, se utilizaron plantas con edad de 2.5 años, a una densidad de siembra de 3 333 plantas ha⁻¹. Se encontró que la máxima producción promedio de café cereza obtenida fue de 9.6 t ha⁻¹ (Alvarez-Lino *et al.* 2023).

CONCLUSIONES

La aplicación de bocashi al cultivo de café aumentó los rendimientos en comparación al tratamiento sin aplicación en un 38.8, 50 y 52.2% a medida que se incrementó la dosis de 3, 6 y 9 kg árbol⁻¹, respectivamente. Esto se puede atribuir a la riqueza nutricional del abono aunado a la gran cantidad de microorganismos benéficos que posee. El análisis económico arrojó que únicamente la dosis de 3 kg es rentable cuando el precio del café alcanza un mínimo de 19.14 pesos por kilogramo. Por debajo de ese precio de mercado no es costable aplicar bocashi en plantaciones de café de la región en estudio.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor José de Jesús Espinoza Arellano por su valiosa colaboración en el análisis económico que se realizó en esta investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abebe TG, Tamtam MR, Abebe AA, Abtemariam K, Shigut TG, Dejen YA, Haile EG (2022) Growing use and impacts of chemical fertilizers and assessing alternative organic fertilizer sources in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science* 2022: 1-14. <https://doi.org/10.1155/2022/4738416>
- Aguilar-Jiménez CE, Alvarado-Cruz I, Martínez-Aguilar FB, Galdámez-Galdámez J, Antonio Gutiérrez-Martínez A, Morales-Cabrera JA (2016) Evaluación de tres abonos orgánicos en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en etapa de vivero. *Siembra* 3: 011-020. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.211>
- Alvarez-Lino M, Ruilova V, Abad-Guamán R, Capa-Morocho M (2023) Influencia de diferentes estrategias de nutrición en la etapa reproductiva del café (*Coffea arabica*) en la región sur del Ecuador. *CEDAMAZ* 13: 195-204. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v13i2.1831>
- Amalia L, Budiasih R, Ria ER, Widodo RW, Kuswati U (2020) Fermented compost and N-fertilizer for enhancing the growth and productivity of purple eggplant on vertisols. *Open Agriculture* 5: 898-904. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0084>
- Boudet-Antomarchi A, Boicet-Fabré T, Santos-Durán R, Meriño Y, Hernández ME (2017) Efecto sobre el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de diferentes dosis de abono orgánico bocashi en condiciones agroecológicas. *Centro Agrícola* 44: 37-42.
- Boudet-Antomarchi A, Chinchilla-Calderón VE, Boicet-Fabré T, González-Gómez G (2015) Efectos de diferentes dosis de abono orgánico tipo bocashi en indicadores morfológicos y productivos del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) var. California wonder. *Centro Agrícola* 42: 5-9.
- Canseco-Martínez D, Villegas-Aparicio Y, Castañeda-Hidalgo E, Carrillo-Rodríguez JC, Robles C, Santiago-Martínez GM (2020) Respuesta de *Coffea arabica* L. a la aplicación de abonos orgánicos y biofertilizantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11: 1285-1298. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2612>
- CIMMYT (1988) La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. CIMMYT. México. 79p.
- Cruz R, Zárate A, Rojas E, Poma V (2020) Efecto del abono orgánico acelerado en plantones de café (*Coffea arabica* L.). *Anales Científicos* 81: 376-384. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v81i2.1667>
- Das S, Chatterjee A, Pal TK (2020) Organic farming in India: A vision towards a healthy nation. *Food Quality and Safety* 4: 69-76. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaa018>
- Espinosa-García JA, Uresti-Gil J, Vélez-Izquierdo A, Moctezuma-López G, Uresti-Durán D, Góngora-González SF, Inurreta-Aguirre HD (2016) Productividad y rentabilidad potencial del café (*Coffea arabica* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1: 2011-2024.
- Espinoza-Arellano JDJ, Cano-Ríos P, Medina-Elizondo M, Molina-Morejón VM (2010) Evaluación técnica y económica de la generación y transferencia de la tecnología de producción “camas angostas” en melón en la Comarca Lagunera, México. *Producción agrícola – Agrofaz* 10: 137-144.
- Eyinate GA, Mushunje A, Yusuf SFG (2021) The willingness to consume organic food: A review. *Food and Agricultural Immunology* 32: 78-104. <https://doi.org/10.1080/09540105.2021.1874885>
- Gómez-Martínez MJ (2019) El café en México: diversidad de sistemas y de especies, En: Mora-Delgado J, Gómez-Martínez MJ, Rodríguez-Rodríguez P (eds) *Retrospectiva del café en Mesoamérica y Colombia: Un análisis de casos*. Universidad del Tolima. Ibagué-Tolima. Colombia. pp. 7-45.
- Gómez-Velasco DA, Álvarez-Solís JD, Ruiz-Valdiviezo VM, Abud-Archila M, Montes-Molina JA, Dendooven L, Gutiérrez-Miceli FA (2014) Enzymatic activities in soil cultivated with coffee (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon') and amended with organic material. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45: 2529-2538. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.932375>
- González-González JA (2008) Manual básico SPSS: Manual de introducción a SPSS. Programa jóvenes profesionales. Centro de inserción laboral. Universidad de Talca, Chile. 79p.

- Hernández ME (1989) Influencia de la temperatura en las etapas fenológicas del café. Investigaciones Geográficas 1: 53-70. <https://doi.org/10.14350/rig.58981>
- INIFAP (2023) Elaboración Bocachi. Manuales prácticos para la elaboración de bioinsumos. Estrategia de Acompañamiento Técnico. INIFAP. México. 25p.
- Kruker G, Guidi ES, Santos JM, Mafra ÁL, Almeida JA (2023) Quality of bokashi-type biofertilizer formulations and its application in the production of vegetables in an ecological system. Horticulturae 9: 1314. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121314>
- López-García FJ, Cruz-Castillo JG, Escamilla-Prado E (2021) Variedades de *Coffea arabica* L. con manejo orgánico en Oaxaca. Acta Agrícola y Pecuaria 7: E0071014. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071014>
- López-Tolentino G, Muñoz-Orsorio GA, Marín-Colli EE, Castillo-López E, Canul-Tun CE, Alonso-Zuñiga E (2023) Fertilización con bokashi sobre el crecimiento y rendimiento de tomate bola (*Solanum lycopersicum* L.) en Yucatán. Avances en Investigación Agropecuaria 27: 166-174. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.23.27.28>
- Martínez HEP, Andrade SA, Santos RHS, Baptistella JLC, Mazzafera P (2024) Agronomic practices toward coffee sustainability: A review. Scientia Agrícola 81:e20220277. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0277>
- Mendivil-Lugo C, Nava-Pérez E, Armenta-Bojórquez AD, Ruelas-Ayala RD, Félix-Herrán JA (2020) Elaboración de un abono orgánico tipo bocashi y su evaluación en la germinación y crecimiento del rábano. Biotecnia 22: 17-23. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1120>
- Montes-Rojas C, Anaya-Flórez MDS (2019) Efecto de la fertilización con abono orgánico (A.L.O.F.A) en plantas de café (*Coffea arabica*). Scientia Et Technica 24: 340-348. <https://doi.org/10.22517/23447214.19801>
- Montoya REC, Jaramillo RA (2016) Efecto de la temperatura en la producción de café. Cenicafé 67: 58-65.
- Mosquera AT, Melo M, Quiroga C, Avendaño D, Barahona M, Galindo F, Lancheros J, Prieto S, Rodríguez A, Sosa D (2016) Evaluación de fertilización orgánica en cafeto (*Coffea arabica*) con pequeños productores de Santander, Colombia. Temas Agrarios 21: 90-101. <https://doi.org/10.21897/rta.v21i1.894>
- Mota-Fernández IF, Valdés-Rodríguez OA, Sol-Quintas G, Pérez-Vázquez A (2019) Response to bocashi and the vermicompost of *Moringa oleifera* Lam. after pruning. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10: 289-299. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.827>
- Muñoz-Rocha BG, Zermeno-González A, Ramírez-Rodríguez H, Betancour-Galindo B, Hernández-Pérez A (2025) Bocashi y fertilización NPK afectan la producción de higuera cv. Black Mission. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12: e4179. <https://doi.org/10.19136/era.a12n2.4179>
- Murillo-Montoya SA, Mendoza-Mora A, Fadul-Vasquez CJ (2020) La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales 7: 58-68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>
- Pegorer-de-Siqueira AP, De-Siqueira MFB (2013) Bokashi adubo orgânico fermentado. Manual Técnico 40. Niterói: Programa Rio Rural. Brasil. 16p.
- Prisa D (2020) EM-Bokashi addition to the growing media for the quality improvement of *Kalanchoe blossfeldiana*. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Advanced Technology 1: 52-59.
- Pulgarín JA (2007) Crecimiento y desarrollo de la planta de café. In: Chinchiná (ed) Sistemas de producción de café de Colombia. Cenicafé. Colombia. pp. 21-60.
- Quiroz M, Céspedes C (2019) Bokashi as an amendment and source of nitrogen in sustainable agricultural systems: a review. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 19: 237-248. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0009-9>
- Ramírez-Builes VH, Jaramillo-Robledo Á, Arcila-Pulgarín J (2013) Factores climáticos que intervienen en la producción del café en Colombia, En: Cenicafé, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

- Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Colombia. pp. 205-237. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_10
- SAS (2022) SAS® OnDemand for Academics. Statistical Analysis System. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. https://www.sas.com/en_us/software/on-demand-for-academics.html. Fecha de consulta: 24 de junio de 2024.
- SADER (2018) México, onceavo productor mundial de café. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe>. Fecha de consulta: 14 de abril 2024.
- SADER (2022) Cultivo de café en México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico>. Fecha de consulta: 14 de abril 2024.
- Santos CC, Vieira MDC, Zárate NAH, Carnevali TDO, Gonçalves WV (2020) Organic residues and bokashi influence in the growth of *Alibertia edulis*. Floresta E Ambiente 27: e20171034. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.103417>
- SIAP (2024) Anuario estadístico de la producción agrícola (Café cereza). <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 24 de noviembre 2024

Artículo 2

RESPUESTA DE DIFERENTES MANEJOS NUTRICIONALES EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CAFÉ (*Coffea arabica* L.)

RESPONSE OF DIFFERENT NUTRITIONAL MANAGEMENT IN COFFEE PRODUCTIVITY (*Coffea arabica* L.)

Alicia García-Moreno¹, José Luis Reyes-Carrillo^{1*}, Urbano Nava-Camberos², José Luis García-Hernández², Roberto Sánchez-Lucio³, Pedro Cano-Ríos¹, Eduardo Aron Flores-Hernández¹ y Mercedes Georgina Ramírez-Aragón⁴

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN-UL), Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera Santa Fe S/N., Torreón, Coahuila, México. C.P. 27054. Email: aliciagarmo24@gmail.com, jlreyes54@gmail.com*, canorp49@hotmail.com, sical208@hotmail.es

²Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia (FAZ), Carretera Gómez Palacio – Tlahualilo km 32., Venecia, Durango, México. C.P. 35170. Email: nava_cu@hotmail.com, luis_garher@ujed.com

³Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Santiago: Carretera Internacional México – Nogales km 6, Centro., Santiago Ixcuintla, Nayarit, México. C.P. 63300. Email: roberto_sanchez_lucio@yahoo.com

⁴Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico Km. 14.5, Plácido Domingo, Lerdo, Durango, México. C.P. 35150 Email: ginaaragon13@hotmail.com

SUMMARY

Background. For coffee cultivation, nutritional management is a decisive component not only in yield parameters but also in the expression of the bean's nutraceutical characteristics. **Objective.** To evaluate the response of different nutritional management practices on some nutraceutical and productivity variables in coffee cultivation. **Methodology.** The influence of different nutritional management practices on fruit growth variables was evaluated across different sampling dates, as well as on yield and some nutraceutical variables in coffee cultivation. A completely randomized experimental design was used. Data were analyzed using analysis of variance, as well as simple linear and quadratic regression; means were compared using the LSD test. **Results.** The orchard with inorganic management showed the highest yield, as well as the highest antioxidant capacity. Regarding the content of total phenols and flavonoids, the highest values were obtained in the orchard with organic management. Fruit growth showed a high magnitude based on the accumulated caloric units across the different sampling dates. **Implication.** This study highlights the importance of different nutritional management practices on the yield, development, and quality of coffee beans. **Conclusion.** The type of nutritional management influences the growth, development, and quality phases of the fruit, as well as total yield, in different ways.

Key words: Yield; fruit growth; weight; antioxidant capacity; flavonoids; phenols.

RESUMEN

Antecedentes. Para el cultivo de café, el manejo nutricional constituye un componente decisivo no solo en los parámetros de rendimiento, sino también en la expresión de las características nutraceuticas del grano. **Objetivo.** Evaluar la respuesta de diferentes manejos nutricionales sobre algunas variables nutraceuticas y de productividad en el cultivo de café. **Metodología.** Se evaluó la influencia de diferentes manejos nutricionales sobre variables de crecimiento del fruto a través de diferentes fechas de muestreo, así como el rendimiento y algunas variables nutraceuticas en el cultivo de café. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza, además de regresión lineal simple y cuadrática, las medias se compararon mediante la prueba DMS. **Resultados.** La huerta con manejo inorgánico mostró el rendimiento más alto, así como en la capacidad antioxidante. En cuanto al contenido

de fenoles y flavonoides totales, los valores más altos se obtuvieron en la huerta con manejo orgánico. El crecimiento del fruto mostró una correlación alta en base a las unidades calor acumuladas en las diferentes fechas de muestreo. **Implicaciones.** Este estudio destaca la importancia de los distintos manejos nutricionales sobre el rendimiento, desarrollo y calidad del grano de café. **Conclusión.** El tipo de manejo nutricional influye de manera diferente en las fases de crecimiento, desarrollo y calidad del fruto, así como en el rendimiento total.

Palabras clave: Rendimiento; crecimiento del fruto; peso; capacidad antioxidante; flavonoides; fenoles.

INTRODUCCION

El café, conocido también como cafeto, es un género de árboles de la familia de las rubiáceas, esta palabra se refiere tanto a sus semillas como a la bebida que se prepara con ellas (SADER, 2024). A escala global, el café es la bebida estimulante sin alcohol más vendida (Gómez-Martínez, 2019). El cultivo de café se introdujo en México en el año de 1796, desde sus inicios su producción se llevó a cabo en pequeña y mediana escala, principalmente en haciendas y ranchos (INIFAP, 2021a). En la actualidad México ocupa la undécima posición en producción de café y es uno de los principales productores de café orgánico en el mundo (SADER, 2022), por lo que la nutrición del cultivo debe considerarse esencial, no solo para incrementar los rendimientos, sino para mejorar la calidad del grano.

Para la mayoría de los cultivos, la nutrición es un factor que determina la cantidad y calidad de las cosechas, sin embargo, para el cultivo de café, el suministro adecuado de nutrientes juega un papel importante en las características organolépticas de los granos y consecuentemente en la calidad de taza. (INIFAP, 2021b). Además tiene influencia sobre la calidad nutracéutica de los granos, como la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles y polifenoles (Bajaj and Ballal, 2021). Generalmente el contenido de nutrientes que el suelo tiene como reserva no es suficiente para conseguir los rendimientos esperados, por lo que es necesario llevar a cabo acciones que permitan incrementar y mantener la fertilidad del suelo, y así satisfacer las necesidades del cultivo (Sadeghian-Khalajabadi, 2010). La fertilización no sólo cumple un papel agronómico, sino que también tiene implicaciones económicas que afectan la rentabilidad del cultivo debido a los elevados costos de fertilización (Sadeghian-Khalajabadi, 2008). En este contexto, resulta relevante considerar que únicamente entre 50-60 % de los fertilizantes aplicados son aprovechados en el cultivo de café, mientras que el resto se pierde, generando contaminación y mayores costos (León-Chilito, Casanova-Olaya et al., 2025). Así mismo, se ha encontrado que la producción de café puede disminuir en más de 40 % cuando no se realiza la labor de la fertilización, para proporcionar los elementos requeridos (Sadeghian-Khalajabadi, 2010).

La variación del requerimiento nutricional del cultivo de café tiene un rango amplio que depende de factores como la variedad, el rendimiento esperado, la edad de la planta, y factores de manejo, como la densidad de población. Por lo tanto no solo se tiene que tomar en cuenta los datos proporcionados de extracción de nutrientes por parte del cultivo ni tratar de generalizarla dentro de una misma localidad (INIFAP, 2021b). Es por ello que se hace imprescindible el uso de análisis de suelo, cuya finalidad es administrar únicamente la demanda del cultivo y con ello reducir los costos de producción (Sadeghian-Khalajabadi, 2008).

De manera general la nutrición influye sobre el rendimiento y calidad de las cosechas, además de tener efectos positivos en el desarrollo fenológico de las plantas (Du, Xiao et al., 2021, Ishfaq, Wang et al., 2023). Se ha documentado que el rendimiento de los cultivos aumenta en un 30.9 % y la calidad nutricional en un 11.9 % cuando se incorpora algún tipo de fertilización independientemente de la fuente (Ishfaq, Wang et al., 2023). La nutrición tanto química como la orgánica juegan un papel importante en el desarrollo del cultivo de café. Dentro de la fertilización orgánica destacan el compost y lombricompost de pulpa de café, la gallinaza, la pollinaza, el estiércol vacuno, el encalamiento y las cenizas (Sadeghian-Khalajabadi, 2008). No obstante, el abono orgánico más utilizado en las huertas cafetaleras es el compost de pulpa de café (Sadeghian-Khalajabadi, 2008).

Por su alta concentración de nitrógeno, la urea (46 %) es la fuente de fertilización química más utilizada, aunada a su menor costo por unidad de elemento suministrado (Sadeghian-Khalajabadi, 2008). Fuentes sintéticas frecuentemente citadas en la bibliografía cafetalera incluyen, sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), nitrato de amonio (HNO_3), fosfatos monoamónico-MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), fosfatodiamónico-DAP ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$), cloruro de potasio (KCl) y sulfato de potasio (K_2SO_4) (Sadeghian-Khalajabadi, 2013). Sin embargo, no solo los macronutrientes son relevantes para el cultivo de café; los micronutrientes también desempeñan un papel crucial en la calidad del grano y de la bebida. Por ejemplo, Rosas-Arellano, Escamilla-Prado et al. (2008) encontraron que el zinc tiene una influencia directa sobre la calidad física y organoléptica del grano de café, el manganeso juega un papel importante en la forma de los granos, el calcio, magnesio y hierro influyen en la fragancia, el fósforo, la materia orgánica y el nitrógeno en el aroma (nariz), el boro en el sabor, y el cobre en la intensidad de acidez de la bebida.

La fertilización orgánica puede sustituir de forma parcial e incluso total a la fertilización química, sin afectar la productividad del cultivo de café, siempre y cuando se suministren las cantidades adecuadas de nutrientes requeridos por las plantas (Sadeghian-Khalajabadi, 2008). Dentro de los beneficios del manejo orgánicos se encuentran, el mejoramiento de la calidad del suelo, la promoción de la biodiversidad, además de la reducción del uso de fertilizantes sintéticos, lo que contribuye a la sostenibilidad ecológica (Jones, Mugendi et al., 2025). Sea cual sea la fuente de nutrición empleada, la respuesta del cultivo a los diferentes manejos dependerá en gran medida de las condiciones edáficas, climáticas, la edad del cafetal y las prácticas agronómicas previas; por ello, diversos estudios recomiendan ajustar las dosis de fertilización con base en análisis de suelo y pruebas locales, con el fin de evitar tanto deficiencias como pérdidas de nutrientes (Chen, Liu et al., 2024, Zhao, Xiong et al., 2018). En este sentido, la integración del razonamiento por casos y el conocimiento técnico puede optimizar la toma de decisiones en el manejo nutricional, garantizando un uso más eficiente y adaptado a las condiciones particulares de cada sistema productivo (León-Chilito, Casanova-Olaya et al., 2025).

Estudios indican que las fuentes de nutrientes orgánicos e integrados (orgánico-inorgánico) pueden proporcionar nutrientes suficientes para el crecimiento adecuado del cultivo de café. Además, el uso del manejo integrado de la fertilidad podría ser la mejor opción, dado que reduce tanto los costos de fertilizantes inorgánicos como la cantidad de fertilizantes orgánicos requerida para un crecimiento eficiente del café (Chemura, 2014). Así mismo, algunos trabajos muestran que en conjunto el manejo orgánico e inorgánico suelen mejorar indicadores de suelo, como la microbiota y el contenido de materia orgánica del suelo. También mantienen o incrementan el rendimiento frente a aplicar solo uno de los dos manejos, especialmente en suelos degradados (Jiang, Lou et al., 2023, Velmourougane, 2016).

Al evaluar el efecto de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en el crecimiento del café y las propiedades del suelo, se encontró que la aplicación de una dosis del 50 % de nitrógeno y fósforo de fuentes de fertilizantes inorgánicos y una dosis del 50 % de compost a base de cascarilla de café aumento significativamente el rendimiento ($2083.5 \text{ kg ha}^{-1}$) a diferencia de los tratamientos 100 % de fertilizante tanto orgánico como inorgánico (Atnafu, Kedir et al., 2021). Contrastando ambos manejos, se ha encontrado que el uso de abono orgánico mejora el crecimiento del café en etapa vegetativa con niveles bajos de agua, mientras que la aplicación de fertilizantes inorgánicos resulta en un mayor crecimiento con niveles más altos de agua (Chemura, 2014). Esto debido a la capacidad de retención de agua por parte del abono.

La aplicación combinada de fuentes inorgánicas y orgánicas mejoran la calidad de las cosechas, pues se ha encontrado que el manejo organomineral mejora el uso de nutrientes y favorece la producción y desarrollo del cultivo de café (Mota, Ferraz-Almeida et al., 2023b). También, la combinación orgánico-inorgánico influye positivamente en la materia orgánica del suelo, N total y mejora rendimiento y actividad enzimática del suelo (Jiang, Lou et al., 2023). En contraste con lo anterior, se ha encontrado que la fertilización inorgánica puede sustituir a la orgánica, cuando se fracciona en cuatro aplicaciones, mejorando el microambiente del suelo, el rendimiento, la calidad nutricional y el sabor del café (Huang, Liu et al., 2025). La nutrición del cultivo de café, mediante cualquier fuente de fertilización mejora el rendimiento, la calidad de la cosecha y el desarrollo de las plantas, siendo clave la planificación y combinación de las fuentes para optimizar la producción. Independientemente de la fuente de fertilización, esta va a influir sobre los

componentes de rendimiento y el desarrollo de la planta (Khemira, Medebesh et al., 2023), además de la calidad nutracéutica de la cosecha (Ishfaq, Wang et al., 2023). Por esta razón, es importante conocer como influyen los diferentes manejos nutricionales en el rendimiento y crecimiento del fruto del café, además de algunas variables de calidad nutracéutica en la región de estudio. Con los resultados obtenidos se pretende brindar una herramienta para la toma de decisiones relacionadas con la nutrición y su respuesta ante las variables estudiadas. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta de diferentes manejos nutricionales sobre algunas variables de productividad en el cultivo de café. Por lo tanto, los diferentes manejos nutricionales influirán de manera distinta en cada una de las variables de productividad en estudio.

MATERIALES Y METODOS

Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en el ejido de Cumbres de Huicicila municipio de Compostela, Nayarit, México. El área de estudio se ubica a 21.309796 LN, -105.015199 LO, con una altitud 915 msnm, precipitación anual promedio de 1200 mm y temperatura media anual de 20 °C. Para el establecimiento del experimento se utilizaron tres huertas de café (*Coffea*) variedad típica de la especie *arabica*, con diferente manejo nutricional: 1) sin manejo, 2) manejo orgánico (compost de cascara de café) y 3) inorgánico (urea). Las huertas cuentan con una densidad de plantación de 3.333 árboles ha⁻¹ cultivados en un sistema agroforestal, bajo sombra regulada en terrenos con gran diversidad de árboles, cafetos de tamaño estandarizado, follaje abundante, buen estado fitosanitario y edad de 7 años. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, donde cada huerta fue un tratamiento y en cada tratamiento se evaluaron en cinco árboles.

Variables evaluadas

Crecimiento del fruto: largo y ancho del fruto (mm). Esta variable se midió con un vernier marca TRUPER®, a partir del 15 de agosto al 15 de diciembre (cada mes durante cinco meses). La información obtenida del crecimiento del fruto se correlacionó con las unidades calor (UC).

Peso individual del fruto a través del tiempo (g): el peso del fruto se midió en conjunto con el crecimiento del fruto, en cada huerta se seleccionaron al azar 10 frutos por árbol, dando un total de 50 frutos. El peso se obtuvo utilizando una báscula digital marca Aquila® modelo BA3100 con capacidad de 10 kilogramos.

Rendimiento por cosecha (t ha⁻¹): el café cereza (fruto con color) se cosechó en cuatro diferentes fechas (15 de diciembre, 6 de enero, 26 de enero y 16 de febrero), los frutos fueron pesados en una báscula digital marca Aquila® modelo BA3100 con capacidad de 10 kilogramos.

Rendimiento total de café cereza (t ha⁻¹): esta variable se obtuvo de la sumatoria del rendimiento de café cereza en las tres fechas de cosecha.

Sólidos solubles (°Brix) por cosecha: la toma de datos de sólidos solubles se realizó en las tres fechas de cosecha. En cada huerta se seleccionaron 10 frutos por árbol, dando un total de 50 frutos muestreados por cosecha. Se utilizó un refractómetro digital ATS modelo sku: 86881005N2664.

Capacidad antioxidante (CA)

Se realizó en cerezas de café frescas, según la metodología propuesta por Soto et al. (2016) con modificaciones. El radical ABTS (2,2'-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid se obtuvo mediante la reacción de ABTS (7 mM) con persulfato de potasio (K₂S₂O₈) 2,45 mM, posteriormente se aforó con agua a un volumen de 10 ml y se incubó a temperatura ambiente (\pm 25°C) y en la oscuridad durante 18 h. El radical ABTS se diluyó en etanol hasta obtener un valor de absorbancia comprendido entre 0, 80 (\pm 0,1) a una longitud de onda de 754nm. Los extractos se disolvieron en etanol a una concentración de 200 mg L⁻¹. Seguido se colocaron en un tubo de ensayo 50 μ L de muestra y 1950 μ L de ABTS, se agitaron durante 1

minuto y mantuvieron en la oscuridad durante 10 min. Posterior a la reacción se leyó la absorbancia a 754 nm. Los resultados se expresaron μmol de aox en base trolox g^{-1} de muestra (μmol Eq. trolox g^{-1}).

Compuestos fenólicos totales (CFT)

La determinación de compuestos fenólicos totales se realizó en cerezas de café frescas por espectrofotometría, basándose en la reacción colorimétrica de óxido-reducción según Lillo et al. (2016) con algunas modificaciones. A 30 μL de extracto se le agregaron 2mL de agua destilada, 250 μL de reactivo Folin-Ciocalteu (grado analítico, Sigma-Aldrich, St. Louis MO, USA), posteriormente se agregó 1 mL de Na_2CO_3 al 10 % p/v y se aforó a 5 mL con agua destilada. Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 765 nm después de permanecer 1 hora a temperatura ambiente y en ausencia de la luz. Para el cálculo de fenólicos totales se realizó una curva de calibración con ácido gálico grado analítico (Sigma-Aldrich St. Louis MO, USA). El contenido de fenólicos se expresó en mg EAG g^{-1} de PF (mg equivalentes de ácido gálico por gramo de peso fresco).

Flavonoides totales (FT)

En cerezas de café frescas se cuantifico los FT mediante un análisis espectrofotométrico basado en la formación de un complejo entre los iones de Al (III) y los grupos carbonilo e hidroxilo del flavonoide, según lo descrito por Lillo et al. (2016) con algunas modificaciones. Se mezclaron 50 μL de extracto con 100 μL de AlCl_3 al 5 % p/v en etanol, 100 μL de acetato de sodio 1 M y se aforó a 5 mL con metanol grado analítico (JT Baker). Los compuestos flavonoides se midieron a una longitud de onda de 520 nm después de 30 minutos de permanecer en ausencia de luz. Previo a la lectura se realizó una curva de calibración con quercetina grado analítico (Sigma-Aldrich St. Louis MO, USA). El contenido de flavonoides se expresa en mg EQ g^{-1} de PF (mg equivalentes de quercetina por gramo de peso fresco).

Unidades Calor:

Las UC se calcularon por el método residual de acuerdo con Hernández (1989), de la siguiente manera:

$$UC = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} - T_{\text{base}}$$

Donde: UC= unidades calor, $T_{\text{máx}}$ = temperatura máxima, $T_{\text{mín}}$ = temperatura mínima y T_{base} = temperatura base.

Para la temperatura base se consideró 8 °C según la literatura (Hernández, 1989). Para el cálculo de las UC se utilizó una base datos de temperaturas -correspondiente al periodo de estudio-, proporcionada por la estación meteorológica perteneciente a CONAGUA ubicada en Cumbres de Huicicila, Compostela Nayarit.

Análisis Estadístico

Los datos de crecimiento de fruto (largo y ancho), peso del fruto individual a través del tiempo, sólidos solubles, rendimiento por cosecha, rendimiento total, capacidad antioxidante, compuestos fenólicos y flavonoides fueron sometidos a análisis de varianza (PROC ANOVA), bajo un diseño experimental completamente al azar. Las comparaciones de medias de tratamientos de manejo nutricional se realizaron con la prueba de DMS ($P = 0.05$).

Se utilizaron análisis de regresión lineal simple y cuadrático para describir el crecimiento del fruto de café (largo, ancho y peso) en función de la fecha de muestreo, expresada en UC acumuladas a partir del inicio de floración. El modelo empleado fue:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

Donde: y = variable dependiente, largo (mm), ancho (mm) y peso del fruto (g); b_0 = intercepto; b_1 y b_2 = coeficientes de regresión; x_1 = variable independiente, UC; x_2 = variable independiente, UC². Los criterios para determinar la existencia de una relación lineal significativa entre las variables predictoras y de respuesta

fueron los valores de $P > F \leq 0.05$ (modelo completo), de $P > t \leq 0.05$ (intercepto y cada variable independiente) y del coeficiente de determinación ($r^2 \geq 0.60$). El paquete estadístico utilizado fue SAS versión 9.0 (SAS 2002).

RESULTADOS

Crecimiento del fruto a través del tiempo

Largo del fruto (mm). En la Tabla 1 se muestran los resultados para la variable largo del fruto del café en diferentes fechas de muestreo, detectándose diferencias significativas entre tratamientos de manejo del 14 de agosto al 10 de noviembre ($P = 0.0050 - 0.0470$), pero no hubo diferencias significativas el 15 de diciembre ($P = 0.01135$). Se puede observar que en la fecha 14 de agosto, la huerta con manejo orgánico obtuvo el mayor largo del fruto (8.86 mm). En el resto de las fechas analizadas el mayor largo del fruto lo obtuvo la huerta con manejo inorgánico, siendo estadísticamente superior a excepción de la fecha 15 de diciembre, donde los tres tipos de manejo fueron similares.

Tabla 1. Comparación de medias para la variable largo del fruto del café (mm) en las diferentes fechas de muestreo

Manejo	Fecha de muestreo				
	14-ago-24	15-sep-24	13-oct-24	10-nov-24	15-dic-24
Sin manejo	8.04ab	13.80ab	13.48b	14.02b	14.68ab
Orgánico	8.86a	12.94b	13.30b	13.40b	14.12b
Inorgánico	7.14b	14.40a	15.08a	15.26a	15.68a

Letras distintas entre medias para una misma fecha indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$).

Ancho del fruto (mm). En la Tabla 2 se encuentran los resultados para la variable ancho del fruto del café en diferentes fechas de muestreo. Se detectaron diferencias significativas solo en la primera fecha de muestreo ($P = 0.0065$), en las restantes fechas de muestreo no hubo diferencias significativas ($P = 0.1510 - 0.9057$). En la primera fecha de evaluación (14 de agosto) las huertas con manejo orgánico y sin manejo fueron estadísticamente superiores a la huerta con manejo inorgánico, con medias de 7.12 y 6.76 mm de ancho de fruto, respectivamente.

Tabla 2. Comparación de medias para la variable ancho del fruto del café (mm) en las diferentes fechas de muestreo

Manejo	Fecha de muestreo				
	14-ago-24	15-sep-24	13-oct-24	10-nov-24	15-dic-24
Sin manejo	6.76a	10.66a	11.26a	10.98a	11.50a
Orgánico	7.12a	10.28a	10.26a	10.68a	11.40a
Inorgánico	5.68b	11.10a	11.08a	11.08a	11.70a

Letras distintas entre medias para una misma fecha indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$).

Peso del fruto a través del tiempo. En la Tabla 3 se encuentran los resultados para la variable peso individual del fruto de café en los diferentes tratamientos de manejo nutricional. Existieron diferencias significativas entre tipos de manejo en las evaluaciones del 14 de agosto, 10 de noviembre y 15 diciembre

($P = 0.0001 - 0.0196$), pero no hubo diferencias significativas para el 15 de septiembre y 13 de octubre ($P = 0.1875 - 0.2181$). En la evaluación del 14 de agosto la media más alta la obtuvo la huerta con manejo inorgánico con 0.60 g por fruto, el 10 de noviembre las medias más altas fueron en las huertas con manejo orgánico e inorgánico con 1.12 g por fruto y el 15 de diciembre los frutos con mayor peso fueron en la huerta con manejo orgánico (media de 1.84 g).

Tabla 3. Comparación de medias para la variable peso del fruto del café (g) en las diferentes fechas de muestreo

Manejo	Fecha de muestreo				
	14-ago-24	15-sep-24	13-oct-24	10-nov-24	15-dic-24
Sin manejo	0.40b	0.72a	0.88a	0.92b	1.44b
Orgánico	0.40b	0.68a	1.00a	1.12a	1.84a
Inorgánico	0.60a	0.80a	1.04a	1.12b	1.32b

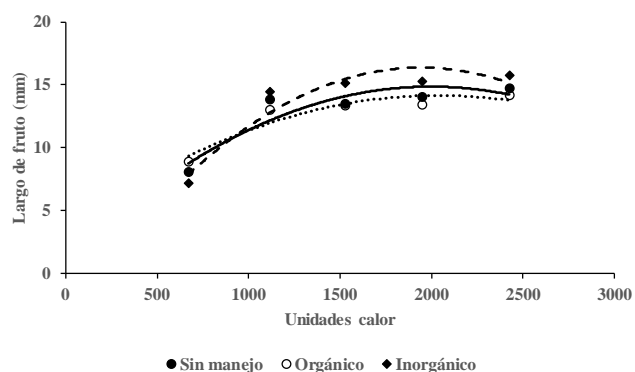
Letras distintas entre medias para una misma fecha indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$).

Crecimiento del fruto en base a las unidades calor acumuladas y en relación con el tipo de manejo nutricional

En la Tabla 4 se muestran las ecuaciones de regresión que estiman el largo, ancho y peso individual del fruto de café (variables dependientes Y) en función de la acumulación de UC a través de las fechas de muestreo (variable independiente X). El crecimiento en tamaño (largo y ancho) del fruto de café mostró una tendencia curvilínea a través del tiempo, expresado en UC calor acumuladas (Figura 1 A, B), de tal manera que las ecuaciones de regresión que mejor describieron dicha tendencia fueron de tipo cuadrático, observándose una mayor capacidad predictiva para las huertas sin manejo ($R^2 = 0.99$) y manejo inorgánico ($R^2 = 0.98$) en comparación con la huerta orgánica ($R^2 = 0.64$ y 0.79). El crecimiento en peso del fruto de café mostró un comportamiento lineal a través del tiempo (Figura 1 C), de tal manera que las ecuaciones de regresión que mejor describieron dicho comportamiento fueron de tipo lineal simple sin intercepto, observándose una alta capacidad predictiva en los tres tipos de manejo nutricional ($R^2 = 0.96 - 0.98$).

Tabla 4. Ecuaciones de regresión para las variables largo, ancho y peso individual del fruto de café en base a las unidades calor acumuladas en los diferentes tipos de manejo nutricional.

Variable dependiente (Y)	Manejo	Ecuación	R^2	$P > F$
Largo	Sin manejo	$Y = 0.0152UC - 0.0000038892UC^2$	0.99	< 0.0001
	Orgánico	$Y = 3.4131 + 0.0105UC - 0.000002585UC^2$	0.79	< 0.0001
	Inorgánico	$Y = 0.0156UC - 0.0000038224UC^2$	0.98	< 0.0001
Ancho	Sin manejo	$Y = 0.0124UC - 0.0000032630UC^2$	0.99	< 0.0001
	Orgánico	$Y = 3.4191 + 0.0072UC - 0.000001659UC^2$	0.64	< 0.0001
	Inorgánico	$Y = 0.0119UC - 0.0000030062UC^2$	0.98	< 0.0001
Peso	Sin manejo	$Y = 0.0005618819UC$	0.96	< 0.0001
	Orgánico	$Y = 0.00067UC$	0.98	< 0.0001
	Inorgánico	$Y = 0.0006031694UC$	0.97	< 0.0001



B

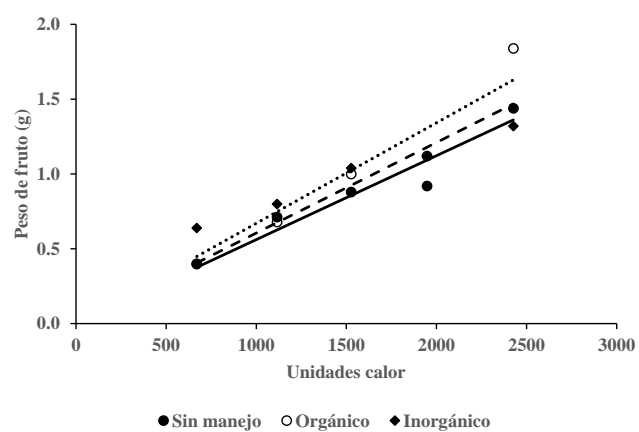
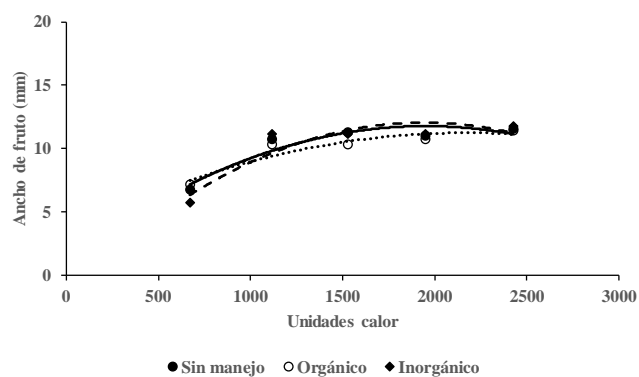


Figura 1. Crecimiento en largo (A), ancho (B) y peso (C) del fruto de café en función de la acumulación de unidades calor en diferentes tipos de manejo nutricional.

Rendimiento por cosecha y rendimiento total de café cereza (t ha⁻¹)

En la Tabla 5 se presenta el rendimiento por fecha de cosecha y el rendimiento total acumulado en cada uno de los tipos de manejo nutricional evaluados. Existió diferencia significativa únicamente en la primera fecha de cosecha ($P = 0.0114$), en donde la huerta con manejo orgánico obtuvo la media más alta con 331.97 kg ha⁻¹. El rendimiento total acumulado mostró diferencia estadística entre las huertas, donde la huerta sin manejo fue la que obtuvo el menor rendimiento con 2009 kg ha⁻¹. El rendimiento más alto lo obtuvo la huerta con manejo inorgánico con 4668 kg ha⁻¹, pero no existió diferencia entre esta huerta y la huerta con manejo orgánico, la cual alcanzó un rendimiento de 2919 kg ha⁻¹.

Tabla 5. Comparación de medias para las variables rendimiento por cosecha y rendimiento total (t ha⁻¹) de café cereza en las diferentes fechas de muestreo

Manejo	Fecha de muestreo				Total
	15-dic-24	06-ene-25	26-ene-25	16-feb-25	
Sin manejo	28.82b	942.5a	942a	95.04a	2009b
Orgánico	331.97a	1007.9a	1508a	71.33a	2919ab
Inorgánico	55.99b	1507.8a	2948a	155.98a	4668a

Letras distintas entre medias para una misma fecha indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$).

Sólidos solubles (°Brix) en el mucílago de las cerezas

En la Tabla 6 se encuentran los resultados para la variable sólidos solubles en las diferentes fechas de muestreo. Se encontraron diferencias significativas entre los tipos de manejo de las huertas en la primera fecha de evaluación ($P = 0.0248$), siendo la huerta sin manejo la que obtuvo la media más alta con 18.94 °Brix. En la segunda fecha de evaluación (26 de enero) la media más alta la registró la huerta con manejo orgánico con 20.52 °Brix, seguida de la huerta sin manejo con 19.78 °Brix, pero no existió diferencia estadística entre ambas. Finalmente, en la tercera fecha de evaluación (16 de febrero) no hubo diferencias estadísticas entre las huertas evaluadas ($P = 0.8063$).

Tabla 6. Comparación de medias para la variable sólidos solubles (°Brix) en el fruto del café en las diferentes fechas de muestreo

Manejo	Fecha de muestreo		
	06-ene-25	26-ene-25	16-feb-25
Sin manejo	18.94a	19.78ab	20.96a
Orgánico	16.96b	20.52a	21.84a
Inorgánico	17.14b	17.38b	20.94a

Letras distintas entre medias para una misma fecha indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$).

Capacidad antioxidante (CA), flavonoides totales (FT) y compuestos fenólicos totales (CFT)

El análisis de varianza para la variable CA no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($P = 0.9682$). Los resultados obtenidos indicaron que la huerta con manejo inorgánico fue la que obtuvo media más alta con 257.42 $\mu\text{mol Eq. trolox g}^{-1}$ café (Tabla 7).

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre tratamientos en la variable CFT ($P = 0.0059$), siendo la huerta con manejo orgánico la que obtuvo la media más alta con 69.2 mg EAG g⁻¹ café, seguida de la huerta con manejo químico 48.6 mg EAG g⁻¹ café y por último la huerta sin manejo con 28.0 mg EAG g⁻¹ café (Tabla 7).

El análisis de varianza para la variable FT mostró diferencias significativas entre tratamientos ($P = 0.0085$). El mayor contenido de FT se obtuvo en la huerta con manejo orgánico con una media de 28.8 mg EQ g⁻¹ café, seguido de la huerta sin manejo y la huerta con manejo inorgánico con una media de 22.7 y 18.5 mg EQ g⁻¹ café respectivamente (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación de medias para la variable capacidad antioxidante, flavonoides totales y compuestos fenólicos totales

	Tratamiento	Media		Tratamiento	Media		Tratamiento	Media
CA	Inorgánico	257.42a	CFT	Orgánico	69.2a	FT	Orgánico	28.8a
	Sin manejo	257.19a		Inorgánico	48.6b		Sin manejo	22.7b
	Orgánico	256.83a		Sin manejo	28.0c		Inorgánico	18.5c

*Capacidad antioxidante (μmol de aox en base trolox g⁻¹ de muestra), flavonoides totales (mg flavonoides en base a quercetina g⁻¹ de muestra) y compuestos fenólicos totales (mg fenólicos en base a ácido gálico g⁻¹ de muestra). Letras distintas entre medias para una misma fecha indican diferencia significativa (DMS, $P = 0.05$).

DISCUSIÓN

Crecimiento del fruto (mm) y peso individual del fruto a través del tiempo (g)

El mayor largo del fruto observado en la evaluación inicial (14 de agosto) en el tratamiento con manejo orgánico sugiere que, durante las primeras etapas de desarrollo del fruto, la liberación pausada de nutrientes desde la materia orgánica y la mejora en la estructura del suelo pueden favorecer la expansión celular. Estudios de cultivo de *C. arabica* señalan que la fase de llenado del fruto está fuertemente influenciada por la disponibilidad de recursos edáficos tempranos como, nutrientes y agua, y que ciertas prácticas de cultivo menos intensivas pueden favorecer un inicio más vigoroso del crecimiento del fruto (Atmaja, Rai et al., 2025, Wormer, 1964). Este patrón inicial coincide con los resultados obtenidos en la huerta con manejo orgánico. Sin embargo, ese efecto temprano no se mantuvo a lo largo del tiempo, lo que sugiere que, aunque el manejo orgánico pudo generar condiciones propicias al inicio, la dinámica nutricional de todo el ciclo del fruto pudo haber resultado menos favorable comparada con el manejo inorgánico.

En las fechas subsecuentes, el tratamiento con manejo inorgánico mostró consistentemente mayor longitud del fruto, superando estadísticamente al orgánico (excepto en la última fecha observada). Este resultado es congruente con hallazgos que indican que la oferta inmediata y sostenida de nutrientes minerales (en particular nitrógeno, fósforo y potasio) permite una mayor tasa de crecimiento del fruto durante la expansión y el llenado. Por ejemplo, Khemira, Medebesh et al. (2023) encontraron que la fertilización incrementa no solo el rendimiento sino también el tamaño del fruto o grano de café. Por tanto, es de esperarse que el manejo inorgánico haya proporcionado una persistente disponibilidad nutricional, permitiendo que los frutos alcanzaran mayor largo a través de una mayor duración del llenado o mayor velocidad de expansión celular.

En cuanto al ancho del fruto, los tratamientos no presentaron diferencias significativas en la mayoría de las fechas; únicamente en la primera fecha (14 de agosto) el ancho fue mayor para orgánico y sin manejo frente al inorgánico. Esto pudiera deberse a que el ancho del fruto es un rasgo menos sensible a las variaciones en el manejo nutricional o que está más fuertemente regulado genéticamente, lo que limita su plasticidad en respuesta al fertilizante. Un estudio que evaluó la asociación entre peso del fruto, largo, ancho y espesor en café encontró que aunque estos parámetros se correlacionan, su variabilidad responde más al genotipo y al ambiente que al manejo nutricional específico (Atmaja, Rai et al., 2025, Mohammed, Merga et al., 2022). Así lo reportó Alvarez-Lino, Ruilova et al. (2023), quienes al evaluar diferentes estrategias de nutrición tanto orgánica como inorgánica en el cultivo de café, con plantas de 2.5 años, encontraron hasta 17.36 mm de ancho y 18.03 mm de largo del fruto, estos valores son más elevados a los encontrados en la presente investigación. También, García-Moreno, Sánchez-Lucio et al. (2025) al evaluar el abono fermentado bocashi encontraron que con la dosis más alta (9 kg árbol⁻¹) se alcanzó hasta 15.71 mm de ancho y 17.82 mm de largo, y con el tratamiento sin abonar se alcanzó 10.33 mm de ancho y 13.86 mm de largo.

En la presente investigación se observó que la huerta con manejo inorgánico presentó los mayores valores de largo y ancho del fruto, lo cual sugiere que la disponibilidad inmediata de nutrientes característica de la fertilización mineral favoreció un crecimiento morfológico temprano más acelerado. Este comportamiento coincide con lo reportado por (Chemura, 2014), quien encontró que los fertilizantes inorgánicos inducen respuestas rápidas en crecimiento vegetativo y desarrollo inicial del fruto debido a su pronta mineralización y absorción por la planta.

Sin embargo, a pesar de que el manejo inorgánico generó frutos de mayor tamaño, el peso del fruto fue mayor en la huerta con manejo orgánico en las fechas tardías de muestreo (10 de noviembre y 15 de diciembre). Este patrón indica que el sistema orgánico favoreció una mayor acumulación de materia seca durante la fase final del llenado del fruto. Mecanismos similares han sido descritos por (Jiang, Lou et al., 2023) quienes señalan que las enmiendas orgánicas mejoran la estructura del suelo, la retención de humedad y la actividad microbiana, factores que posibilitan una disponibilidad sostenida de nutrientes que beneficia la etapa de llenado y maduración. Literatura reciente confirma que la carga de frutos por planta es un factor determinante en el tamaño y peso individual del fruto en *C. arabica*; por ejemplo, León-Burgos, Sáenz et al. (2024) demostraron que cargas mayores reducen el crecimiento vegetativo y la proporción de frutos/granos grandes, lo que respalda la hipótesis de competencia entre frutos por asimilados. En este estudio, dado que la huerta con manejo inorgánico mostró mayor tamaño del fruto (largo y ancho) pero un menor peso en etapas tardías en comparación con la huerta orgánica, esa observación podría explicarse por una carga de frutos más alta en el tratamiento inorgánico, provocando competencia entre frutos y menor acumulación individual de biomasa.

Crecimiento y peso del fruto en base a las unidades calor acumuladas y en relación con el tipo de manejo nutricional

En base a los resultados obtenidos con las ecuaciones de regresión, el ajuste lineal para todos los tratamientos de manejo nutricional excepto el ancho del fruto en la huerta con manejo orgánico fue aceptable ya que el coeficiente de determinación (R^2) para el largo, ancho y peso del fruto varió entre 0.79 y 0.99 (Tabla 4) (González-González, 2008). Esto indica que el crecimiento y el peso del fruto tienen una estrecha relación con las unidades calor acumuladas a través de las fechas de muestreo en las tres huertas evaluadas. El ancho del fruto en la huerta con manejo orgánico presentó un coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0.64$), lo que hace suponer que algún otro factor puede tener relación en el desarrollo del ancho del fruto.

En el presente trabajo de la floración a la cosecha se acumuló un total de 2426.5 UC, lo que coincide con Montoya and Jaramillo (2016) quienes afirman que se necesitan aproximadamente 2500 UC acumuladas entre la primera floración y la cosecha.

Rendimiento por cosecha y rendimiento total de café cereza (t ha⁻¹)

El rendimiento del cultivo de café responde a la interacción entre la disponibilidad de nutrientes (cantidad y forma), la fenología del cultivo y las condiciones edafoclimáticas del sitio. En este estudio se observó una diferencia significativa únicamente en la primera fecha de cosecha, donde la huerta con manejo orgánico alcanzó el mayor rendimiento (331.97 kg ha⁻¹). Esto puede explicarse por una liberación temprana y sostenida de nutrientes desde la materia orgánica disponible (mineralización microbiana), junto con mejores condiciones de retención hídrica y microambiente en el suelo que favorecen el cuajado y amarre de frutos en etapas iniciales. Estudios que documentan efectos positivos de la materia orgánica sobre la dinámica de nutrientes y la retención de agua en suelos de cafeto apoyan esta interpretación (Chaudhary, Bhusal et al., 2022, Jiang, Lou et al., 2023).

El rendimiento total acumulado mostró diferencias entre huertas: la huerta sin manejo fue la de menor rendimiento (2009 kg ha⁻¹), lo que sugiere restricciones por deficiencias nutricionales y menores reservas de biomasa; en contraste, la huerta con manejo inorgánico presentó el rendimiento más alto (4668 kg ha⁻¹). El mayor rendimiento bajo fertilización inorgánica es congruente con múltiples estudios que muestran respuesta inmediata del cafeto a aportes mineralmente solubles (N, P, K) que potencian fotosíntesis,

diferenciación de yemas reproductivas y llenado de fruto, especialmente en etapas de alta demanda (Atnafu, Kedir et al., 2021, Valadares, Neves et al., 2014).

No obstante, la huerta con manejo orgánico (2919 kg ha^{-1}) no difirió estadísticamente del manejo inorgánico en el experimento. Esto sugiere que, bajo ciertas condiciones (suficiente cantidad de materia orgánica, buen manejo del suelo y tiempo de estabilización), los sistemas orgánicos pueden alcanzar niveles productivos competitivos frente a los convencionales. Estudios recientes muestran que, si bien la fertilización mineral tiende a dar respuestas más rápidas en rendimiento, la combinación o manejo correcto de insumos orgánicos puede mantener o acercarse a rendimientos similares, además de mejorar propiedades físicas y biológicas del suelo (Martínez, Andrade et al., 2024, Mota, Ferraz-Almeida et al., 2023a). Así lo demostraron Atnafu, Kedir et al. (2021) en un estudio acerca del efecto de fertilizantes orgánicos e inorgánicos de NP durante cinco años sobre el crecimiento agronómico del cultivo de café. Encontraron en el tratamiento orgánico un rendimiento de $1008.7 \text{ kg ha}^{-1}$ el primer año de estudio, finalizando el quinto año con $2536.7 \text{ kg ha}^{-1}$. El tratamiento con manejo inorgánico obtuvo $1143.2 \text{ kg ha}^{-1}$ el primer año y $2216.7 \text{ kg ha}^{-1}$. No existió diferencia estadística entre el tratamiento orgánico e inorgánico durante los años en estudio, pero sí entre estos. Los fertilizantes orgánicos por sí solos no generan un rendimiento significativo, ya que el rendimiento más alto ($2083.5 \text{ kg ha}^{-1}$) se obtuvieron con una combinación de 50/50 de fertilizante orgánico e inorgánico. Además, se ha encontrado en diferentes investigaciones que el uso integrado de fertilización orgánica-inorgánica incrementa los rendimientos de manera significativa comparado con solo usar uno solo de los manejos (Jiang, Lou et al., 2023, Mota, Ferraz-Almeida et al., 2023b).

Sólidos solubles (°Brix)

El contenido de sólidos solubles en las cerezas de café es un indicador directo del grado de madurez y de la concentración de azúcares y otros compuestos solubles presentes en el mucílago. En este estudio en la primera fecha de cosecha (06 de enero), la huerta sin manejo presentó la media más alta con 18.94°Brix , mientras que en la tercera fecha (16 de febrero) no se registraron diferencias estadísticas entre tratamientos.

Los valores observados en las tres fechas se encuentran dentro del rango reportado para cerezas de *Coffea arabica* en estado óptimo de maduración, el cual oscila entre 12 y 24°Brix , dependiendo de la variedad, altitud y condiciones ambientales (Baptistella, Assoni et al., 2024, Marín-López, Arcila-Pulgarín et al., 2003). Baptistella, Assoni et al. (2024) demostraron que la acumulación de azúcares solubles en la cáscara y el mesocarpio de la cereza aumenta progresivamente conforme avanza la maduración, reflejando una conversión de almidones y ácidos orgánicos hacia azúcares reductores como glucosa y fructosa. Los sólidos disueltos se utilizan como indicador de maduración y palatabilidad además de que reflejan la relación entre los azúcares y las características sensoriales (Alves, Valquíria et al., 2014).

La importancia del contenido de sólidos solubles radica en su efecto sobre la calidad sensorial del café. Lo que demuestra que cerezas con altos valores de $^\circ\text{Brix}$ proporcionan un mayor sustrato para las reacciones bioquímicas que ocurren durante la fermentación y el secado, contribuyendo al desarrollo de atributos sensoriales como dulzor, cuerpo y aroma en la bebida final (Baptistella, Assoni et al., 2024). En estudios acerca de los tiempos de fermentación, se cuantificaron los sólidos solubles totales en cerezas de café (*Coffea arabica*), Sánchez-Riaño, Vega-Oliveros et al. (2024) encontraron un promedio de 15.2°Brix mientras Galarza and Figueroa (2023), encontraron un promedio de 19.9°Brix , valores inferiores a los encontrados en la presente investigación. Otros estudios realizados en cereza de *C. arabica* se han reportado niveles máximos entre 16 y 18°Brix (Tirado-Kulieva, Quijano-Jara et al., 2024, Velásquez, Franco et al., 2021). En contraste con los resultados del presente estudio, los niveles máximos de $^\circ\text{Brix}$ superan a los encontrados en las anteriores investigaciones. En conjunto, los resultados sugieren que tanto el manejo orgánico como la ausencia de manejo pueden influir de forma diferente sobre la acumulación de sólidos solubles en las cerezas.

Capacidad antioxidante

Los resultados del presente estudio muestran que la CA en cerezas frescas se comportó estadísticamente de la misma manera en los diferentes manejos nutricionales. La literatura menciona que la cereza de *C. arabica* contiene compuestos bioactivos de relevancia, como ácidos clorogénicos y flavonoides, que contribuyen a su actividad antioxidante. Por ejemplo, Nemzer, Kalita et al. (2021) identificaron que los extractos de cereza completa poseen un alto contenido de ácidos clorogénicos y mostraron actividad antioxidante significativa. Esto sugiere que la fruta fresca del café tiene capacidad intrínseca de neutralizar radicales libres, lo cual es consistente con los valores elevados observados en este estudio. Además, Lestari, Hasballah et al. (2022) encontraron que los subproductos del café como la pulpa, la cáscara y el mucílago contienen polifenoles y presentan actividad antioxidante variable dependiendo del procesamiento, variedad y condiciones de cosecha. Aunque este artículo se centra en la fruta fresca completa, bajo distintos manejos nutricionales, refuerza la idea de que la síntesis y acumulación de compuestos antioxidantes en el café están moduladas por múltiples factores fisiológicos y agronómicos.

Una limitante de esta investigación recae en que, diversos métodos de medición de la actividad antioxidante (DPPH, FRAP, ABTS, ORAC) pueden arrojar diferentes valores, lo que dificulta la comparación exacta entre estudios (Nemzer, Kalita et al., 2021).

Compuestos fenólicos totales

Los resultados del presente estudio indican que los valores de CFT en cerezas frescas de café difirieron significativamente entre los sistemas de manejo nutricional evaluados. Estos datos sugieren que el manejo nutricional influyó en la acumulación de fenoles totales en la fruta, siendo el sistema orgánico asociado con mayor concentración.

Cabe destacar que, aunque la literatura no documenta de manera específica estudios que comparen directamente distintos sistemas de manejo nutricional y su efecto sobre los fenoles totales en cerezas frescas de café, los datos disponibles en cafés procesados o en frutos indican que variables agronómicas, de procesamiento y de maduración tienen un impacto significativo en el contenido de fenoles (Geremu, Y. et al., 2016, Ostilio and Arévalo, 2025). Muchos estudios miden fenoles en base seca o en subproductos de la cereza como la pulpa o la cáscara, más que en la cereza fresca bajo tratamientos nutricionales, lo que limita la comparación directa con este estudio. Además, los fenómenos de variabilidad en la fruta (grado de maduración, posición en la planta, microclima) pueden influir sustancialmente en los niveles de fenoles totales. Por tanto, aunque los resultados sugieren que el manejo orgánico favorece la acumulación de fenoles totales, se recomienda no generalizar los hallazgos y se alienta a futuras investigaciones que controlen estos factores y exploren la relación entre nutrición, maduración y contenido fenólico en la cereza fresca (Nemzer, Kalita et al., 2021, Ostilio and Arévalo, 2025).

Adicionalmente, se ha encontrado que los diferentes colores de los granos de café influyen en el CFT (Hu, Bi et al., 2023), además de que la cantidad de estos compuestos están relacionados con el lugar de origen (Lazcano-Sánchez, Trejo-Márquez et al., 2015).

Flavonoides totales

Los resultados del presente estudio muestran que la concentración de FT en cerezas frescas de café varió significativamente entre los sistemas de manejo evaluados, siendo la huerta bajo manejo orgánico la que obtuvo la media más alta (28.8 mg EAG g⁻¹). Esto puede indicar que el manejo orgánico favoreció una mayor acumulación de flavonoides en la fruta, además de que la nutrición y condiciones del suelo pueden estar regulando la biosíntesis de estos metabolitos secundarios (Nemzer, Kalita et al., 2021).

Fonseca-García, Calderón-Jaimes et al. (2014) analizaron muestras de café sin tostar y obtuvieron valores en el intervalo de 52.57 a 1904 mg EAG g⁻¹ café para el contenido de fenoles totales. Así mismo Vega, De León et al. (2017) analizaron 34 muestras de marcas comerciales de cafés (*C. arabica*) en Panamá y encontraron un contenido de fenoles totales en el rango de 28.60 a 46.82 mg GAE/g⁻¹ y estos valores superan a los encontrados en el presente estudio.

Aunque los estudios que cuantifican flavonoides en cerezas frescas de café bajo distintos manejos nutricionales son escasos, se reconoce que los flavonoides forman parte integral del metaboloma fenólico del café y que su concentración puede estar influenciada por factores como variedad, madurez, condiciones climáticas y fertilización (Nemzer, Kalita et al., 2021). Un estudio sobre perfiles fitoquímicos de diferentes partes de la planta de café señala que los contenidos de flavonoides totales varían ampliamente entre cultivares y partes de la planta (por ejemplo, hojas vs granos). Esta evidencia apoya que la variabilidad en FT está plenamente documentada en el cultivo de café (Jeon, Natraj et al., 2024). Según Vega, De León et al. (2017) los de FT son componentes que aportan un porcentaje importante de la capacidad antioxidante del café, lo cual se reflejó en la CA encontrada en este estudio para la huerta con manejo orgánico.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el manejo nutricional influye de manera significativa en las fases de crecimiento, desarrollo y calidad fisiológica del fruto de café (*Coffea arabica* L.). El manejo orgánico favoreció una mayor expansión inicial del fruto, atribuible a la liberación gradual de nutrientes y a la mejora de las condiciones físicas y biológicas del suelo. Sin embargo, a lo largo del ciclo, el manejo inorgánico promovió un crecimiento más sostenido en largo y ancho, lo que refleja una mayor disponibilidad inmediata de nutrientes esenciales que impulsan el llenado del fruto. A pesar de ello, en etapas tardías, el peso individual de los frutos fue superior bajo manejo orgánico, indicando una acumulación más eficiente de biomasa y materia seca, posiblemente relacionada con una mejor retención de humedad y una actividad microbiana más activa en el suelo. La relación positiva entre el crecimiento del fruto y las unidades calor acumuladas confirma que el desarrollo del café depende estrechamente de las condiciones térmicas del entorno, siendo el acúmulo de calor un indicador confiable para estimar las etapas fenológicas y el momento óptimo de cosecha.

En cuanto a la calidad del fruto, los tratamientos evaluados mantuvieron valores de sólidos solubles dentro del rango óptimo reportado para cerezas maduras, lo que indica una maduración adecuada bajo todos los sistemas. Sin embargo, las diferencias observadas en el contenido de compuestos bioactivos (fenoles y flavonoides) reflejan que el manejo orgánico puede favorecer la acumulación de metabolitos secundarios asociados con la calidad sensorial del café. Los resultados confirman que la elección del manejo nutricional impacta tanto la productividad como la calidad del café, y que los sistemas orgánicos, además de representar una alternativa ambientalmente más sostenible, pueden ofrecer frutos con mejores características productivas y composición fitoquímica. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de integrar estrategias orgánicas como vía para lograr una producción eficiente, sustentable y de alta calidad en el cultivo de café.

Conflict of interest: Authors have no competing interests to declare.

Author contribution statement (CRediT). A. García-Moreno: Investigation, Writing – original draft. J.L. Reyes-Carrillo: Conceptualization, Writing – review & editing, Supervision. U. Nava-Camberos: Data curation, Formal analysis. J.L. García-Hernández: Methodology. R. Sánchez-Lucio: Validation P. Cano-Ríos: Data curation E.A. Flores-Hernández: Resources, Project administration. M.G. Ramírez-Aragón: Formal analysis, Methodology.

REFERENCIAS

- Alvarez-Lino, M., Ruilova, V., Abad-Guamán, R. and Capa-Morocho, M. 2023. Influencia de diferentes estrategias de nutrición en la etapa reproductiva del café (*Coffea arabica*) en la región sur del Ecuador. *CEDAMAZ* 13(2) 195–204.
- Alves, S.P. et al. 2014. Quality assessment of coffee grown in Campos Gerais, Minas Gerais State, Brazil *Acta Scientiarum. Technology* 36(4) 739-744.
- Atmaja, I., Rai, I. and Sukewijaya, I. 2025. Unveiling the secrets of arabica coffee: How cultivation methods impact quality and chemical composition. *International Journal of Multidisciplinary Research And Analysis* 8(5) 2597-2604.

- Atnafu, O., Kedir, M., Teshale, E. and Nugusie, M. 2021a. effect of organic and inorganic fertilizers on agronomic growth and soil properties of coffee (*Coffea arabica* L.) at Jimma, Southwestern Ethiopia. *International Journal of Current Research and Academic Review* 9(9) 86-94.
- Bajaj, D. and Ballal, S. 2021. A review on antioxidant activity of coffee and its additives. *Journal of Pharmaceutical Research International* 33(25B) 77-85.
- Baptistella, J.L.C., Assoni, G., da Silva, M.S. and Mazzafera, P. 2024. Variation in soluble sugars in arabica coffee cherry fruits. *Plants* 13(13) 1853.
- Chaudhary, J. et al. 2022. Effects of organic manures on yield and yield attributes of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes. *Journal of Agriculture and Natural Resources* 5(1) 175-183
- Chemura, A. 2014. The growth response of coffee (*Coffea arabica* L) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 3 59.
- Chen, H. et al. 2024. Optimizing split-reduced drip fertigation schemes of arabica coffee based on soil microcosms, bean yield, quality and flavor in dry-hot region of southwest China. *Scientia Horticulturae* 336 113418.
- Du, Q.J. et al. 2021. Effects of different fertilization rates on growth, yield, quality and partial factor productivity of tomato under non-pressure gravity irrigation. *PLoS One* 16(3) e0247578.
- Fonseca-García, L., Calderón-Jaimes, L.S. and Rivera, M.E. 2014. Capacidad antioxidante y contenido de fenoles totales en café y subproductos del café producido y comercializado en norte de Santander (Zolombia). *Vitae* 21(3) 228-236.
- Galarza, G. and Figueroa, J.G. 2023. Volatile compound characterization of coffee (*Coffea arabica*) processed at different fermentation times using SPME-GC-MS. *Molecules* 27(6) 2004.
- García-Moreno, A. et al. 2025. Evaluación del uso de bocashi en la productividad y rentabilidad en el cultivo de café. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 12(2) e4572.
- Geremu, M., Y., B.T. and Sualah, A. 2016. Extraction and determination of total polyphenols and antioxidant capacity of red coffee (*Coffea arabica* L.) pulp of wet processing plants. *Chemical Biological Technologies in Agriculture* 3 25.
- Gómez-Martínez, M.J. 2019. El café en México: diversidad de sistemas y de especies. In J. Mora-Delgado, M. J. Gómez-Martínez and P. Rodríguez-Rodríguez eds. Retrospectiva del café en Mesoamérica y Colombia: un análisis de casos. Ibagué-Tolima, Universidad del Tolima. pp. 7-45.
- González-González, J.A. 2008. Manual básico SPSS: Manual de introducción a SPSS. Programa jóvenes profesionales. Centro de inserción laboral. Universidad de Talca, Chile. (Disponible en: https://www.academia.edu/67833717/Manual_basico_spss_universidad_de_talca Fecha de recuperación: noviembre 2024).
- Hernández, M.E. 1989. Influencia de la temperatura en las etapas fenológicas del café. *Investigaciones geográficas* 1(20) 53-70.
- Hu, F. et al. 2023. Comparative metabolome profiles and antioxidant potential of four *Coffea arabica* L. varieties differing in fruit color. *Diversity* 16 574.
- Huang, W. et al. 2025. Enhancing soil microenvironment, bean yield, nutritional quality and flavor of *Coffea arabica* through synergistic inorganic-organic fertilization in Southwest China. *Industrial Crops and Products* 234 121526.

- INIFAP 2021a. La cafecultura en México y su problemática. In R. Compiladores López-Morgado, G. Díaz-Padilla and A. Zamarripa-Colmenero eds. El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción. Veracruz, México, Libro Técnico Núm. 41. pp. 3-27.
- INIFAP 2021b. Suelos y nutrición del cafeto. In R. Compiladores López-Morgado, G. Díaz-Padilla and A. Zamarripa-Colmenero eds. El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción. Veracruz, México, Libro Técnico Núm. 41. pp. 207-230.
- Ishfaq, M. et al. 2023. Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: a global meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 43(6) 74.
- Jeon, Y.A. et al. 2024. comparative analysis of phytochemical and functional profiles of arabica coffee leaves and green beans across different cultivars. *Foods* 13(23) 3744.
- Jiang, Z. et al. 2023. Combined application of coffee husk compost and inorganic fertilizer to improve the soil ecological environment and photosynthetic characteristics of arabica coffee. *Agronomy* 13(15) 1212.
- Jones, K., Mugendi, N.E., Garnett, K. and Girkin, N.T. 2025. Organic management in coffee: A systematic review of the environmental, economic and social benefits and trade-offs for farmers. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 49(8) 1368-1402.
- Khemira, H., Medebesh, A., Hassen Mehrez, K. and Hamadi, N. 2023. Effect of fertilization on yield and quality of Arabica coffee grown on mountain terraces in southwestern Saudi Arabia. *Scientia Horticulturae* 321 112370.
- Lazcano-Sánchez, E., Trejo-Márquez, M.A., Vargas--Martínez, M.G. and Pascual-Bustamante, S. 2015. Contenido de fenoles, cafeína y capacidad antioxidante de granos de café verdes y tostados de diferentes estados de México. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 16(2) 293-298.
- León-Burgos, A.F. et al. 2024. Increased fruit load influences vegetative growth, dry mass partitioning, and bean quality attributes in full-sun coffee cultivation. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 8 1379207.
- León-Chilito, E.D., Casanova-Olaya, J.F., Corrales, J.C. and Figueroa, C. 2025. Sustainabilitydriven fertilizer recommendersystem for coffee crops using casebased reasoning approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 8 1445795.
- Lestari, W., Hasballah, K., Listiawan, M.Y. and Sofia, S. 2022. Coffee by-products as the source of antioxidants: A systematic review *F1000Research* 11 220.
- Marín-López, S.M., Arcila-Pulgarín, J., Montoya-Restrepo, E.C. and Oliveros-Tascón, C.E. 2003. Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Cenicafé* 54 208–225.
- Martinez, H.E.P. et al. 2024. Agronomic practices toward coffee sustainability. A review. *Scientia Agricola* 81 e20220277.
- Mohammed, H., Merga, D. and Ayano, A. 2022. Genotypic association between yield and yield related traits of some coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes. *Asian Journal of Biological Sciences* 15(4) 235-248.
- Montoya, R.E.C. and Jaramillo, R.A. 2016. Efecto de la temperatura en la producción de café. *Cenicafé* 67(2) 58-65.
- Mota, R. et al. 2023a. Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): Fertilizer levels and application times. *Coffee Science* 18 1-10.

- Nemzer, B., Kalita, D. and Abshiru, N. 2021. Quantification of major bioactive constituents, antioxidant activity, and enzyme inhibitory effects of whole coffee cherries (*Coffea arabica*) and their extracts. *Molecules* 26 4306.
- Ostilio, P.R. and Arévalo, C.A. 2025. Coffee's phenolic compounds. A general overview of the coffee fruit's phenolic composition. *Revista Bionatura* 7(3) 1-19.
- Rosas-Arellano, J., Escamilla-Prado, E. and Ruiz-Rosado, O. 2008. Relación de los nutrientes del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana* 26(4) 375-384.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Cenicafé Boletín técnico* N°32 45 p.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2010. Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. Chinchiná. *Cenicafé* (Avances Técnicos No. 391) 8p.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2013. Nutrición de cafetales. En Federación nacional de cafeteros de Colombia. Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura *Cenicafé* 2 85-116.
- SADER 2022. Cultivo de café en México. [https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mexicana%20de%20caf%C3%A9,Puebla%20\(15.3%20por%20ciento](https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mexicana%20de%20caf%C3%A9,Puebla%20(15.3%20por%20ciento). Fecha de consulta abril 2024.
- SADER 2024. Cultivo de café: Desde la planta hasta tu taza. Fecha de consulta: septiembre 2025 <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-desde-la-planta-hasta-tu-taza?idiom=es>.
- Sánchez-Riaño, A.M. et al. 2024. Effects of cherries sanitization methods and fermentation times on quality parameters of coffee beans. *Heliyon* 10(13) e33508.
- Tirado-Kulieva, V., Quijano-Jara, C., Avila-George, H. and Castro, W. 2024. Predicting the evolution of pH and total soluble solids during coffee fermentation using near-infrared spectroscopy coupled with chemometrics. *Current Research in Food Science* 9 100788.
- Valadares, S.V. et al. 2014. Yield gains of coffee plants from phosphorus fertilization may not be generalized for high density planting. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 905-911.
- Vega, A., De León, J.A. and 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.
- Velásquez, S. et al. 2021. Classification of the maturity stage of coffee cherries using comparative feature and machine learning. *Coffee Science* 16 e161710.
- Velmourougane, K. 2016. Impact of organic and conventional systems of coffee farming on soil properties and culturable microbial diversity. *Scientifica (Cairo)* 2016 3604026.
- Wormer, T.M. 1964. The growth of the coffee berry. *Annals of botany* 28(109) 47-55.
- Zhao, Q. et al. 2018. Long-term coffee monoculture alters soil chemical properties and microbial communities. *Scientific Reports* 8 6116.

ORCID

A. García-Moreno: <https://orcid.org/0000-0002-0580-7589>

J.L. Reyes-Carrillo: <https://orcid.org/0000-0001-6696-6981>

U. Nava-Camberos: <https://orcid.org/0000-0001-9192-6754>

J.L. García-Hernández: <https://orcid.org/0000-0002-9190-8190>

R. Sánchez-Lucio: <https://orcid.org/0009-0004-1572-3292>

P. Cano-Ríos: <https://orcid.org/0000-0003-4559-954X>

E.A. Flores-Hernández: <https://orcid.org/000-0001-7358-4578>

M.G. Ramírez-Aragón: <https://orcid.org/0000-0002-8044-3893>

CONCLUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos demuestran que el manejo nutricional, tanto a través de abonos orgánicos como del uso específico de bocashi, desempeña un papel determinante en la productividad, rentabilidad y calidad fisiológica del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). La aplicación de bocashi incrementó significativamente los rendimientos respecto al tratamiento sin fertilización hasta un 50 %, lo cual se le atribuye a su riqueza en nutrientes, contenido de microorganismos benéficos y capacidad para mejorar la estructura y la actividad biológica del suelo.

De manera complementaria, la investigación sobre el manejo nutricional evidenció que los sistemas orgánicos favorecen el desarrollo del fruto y una mejor acumulación de biomasa y materia seca. Aunque el manejo inorgánico mostró una respuesta más rápida y un crecimiento sostenido del fruto, las diferencias en rendimiento no fueron estadísticamente significativas, lo que confirma que los sistemas orgánicos pueden ser igualmente competitivos cuando se manejan adecuadamente. Así mismo, el uso de bocashi y los esquemas orgánicos en general contribuyen a mejorar la calidad del grano al promover una mayor acumulación de compuestos bioactivos, como fenoles, flavonoides y antioxidantes, asociados con la calidad sensorial y el valor agregado del café. Desde el punto de vista económico, si bien la rentabilidad del bocashi depende del precio de mercado, su implementación en dosis bajas representa una alternativa viable cuando se integran estrategias de manejo sustentable.