



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

FERTILIZACIÓN Y EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL

EN LA CALIDAD DEL CAFÉ

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA:

BRYAN ALEXIS DOMÍNGUEZ LÓPEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. GUSTAVO ALMAGUER VARGAS



APROBADA

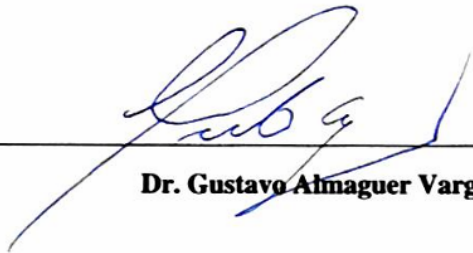


Chapingo, Estado de México a mayo de 2024

**FERTILIZACIÓN Y EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL EN LA CALIDAD DEL
CAFÉ**

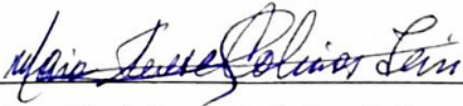
Tesis realizada por Bryan Alexis Domínguez López bajo la supervisión del comité
Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Director 
Dr. Gustavo Almaguer Vargas

Co-director 
Dr. Eduardo Campos Rojas

Asesor 
Dr. Juan Ayala Arreola

Asesor 
Dra. María Teresa B. Colinas León

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
DEDICATORIA.....	IX
AGRADECIMIENTOS	X
DATOS BIOGRÁFICOS.....	XI
GENERAL ABSTRACT	13
I. INTRODUCCIÓN	14
1.1. OBJETIVOS GENERALES	16
1.2. OBJETIVOS PARTICULARES	16
1.3. HIPÓTESIS	16
II. REVISIÓN DE LITERATURA	17
2.1. IMPORTANCIA MUNDIAL DEL CAFÉ	17
2.2. IMPORTANCIA DEL CAFÉ EN MÉXICO	17
2.3. IMPORTANCIA DEL CAFÉ EN PUEBLA	18
2.4. CALIDAD DEL CAFÉ.....	18
2.5. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD FÍSICA Y ORGANOLEPTICA DEL CAFÉ	19
2.4. MEDICIÓN DE LA CALIDAD FÍSICA Y ORGANOLÉPTICA DEL CAFÉ	20
2.5. FENOLOGÍA DEL CAFÉ	21
2.6. ESPECIES COMERCIALES DE CAFÉ.....	22
2.7. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CAFÉ.....	23
2.8. FERTILIZACIÓN EN LA CALIDAD DE CAFÉ	24
2.9. CURVAS DE EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL.....	25
2.10. MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES NUTRIMENTALES.....	26

2.11. LITERATURA CITADA.....	27
III. DESCRIPCIÓN DE LAS FASES FENOLÓGICAS DE CAFÉ (<i>Coffea arabica</i> L.) ‘Geisha Enana’	36
RESUMEN.....	36
ABSTRACT	37
3.1. INTRODUCCIÓN	38
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.2.1. MATERIAL VEGETAL, DISEÑO Y SITIO EXPERIMENTAL	39
3.2.2. FASES FENOLÓGICAS	40
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.4. CONCLUSIONES.....	47
3.5. LITERATURA CITADA	48
IV. CURVA DE EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL DE (<i>Coffea arabica</i> L.) ‘Geisha Enana’	50
RESUMEN.....	50
ABSTRACT	51
4.1. INTRODUCCIÓN	52
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS	53
4.2.1. MUESTREO EN CAMPO	53
4.2.2. FERTILIZACIÓN	54
4.2.3. DETERMINACIÓN DE NUTRIENTES.....	56
4.2.4. NITRÓGENO (N)	57
4.2.4. POTASIO (K).....	59
4.2.5. CALCIO (Ca)	60
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.3.1. MATERIA SECA DE LOS FRUTOS.....	62
4.3.2. EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL EN HOJA Y FRUTO	64
4.4. CONCLUSIÓN.....	67

4.5. LITERATURA CITADA	68
V. FERTILIZACIÓN EN LA CALIDAD DE CAFÉ (<i>Coffea arabica</i> L.)	
‘Geisha Enana’	70
RESUMEN.....	70
ABSTRACT	71
5.1. INTRODUCCIÓN	72
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS	74
5.2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	74
5.2.2. FERTILIZACIÓN	75
5.2.3. COSECHA Y ANÁLISIS FÍSICO DEL GRANO	77
5.2.4. ANÁLISIS SENSORIAL	78
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
5.3.1. RENDIMIENTO AGROINDUSTRIAL Y CALIDAD FÍSICA DEL GRANO DE CAFÉ.	79
5.3.2. ANÁLISIS FÍSICO POR TRATAMIENTO.....	86
5.3.3. ANÁLISIS SENSORIAL DEL CAFÉ (BEBIDA)	95
5.4. CONCLUSIONES.....	100
5.5. LITERATURA CITADA	101

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. ESCALA FENOLÓGICA PARA CAFÉ CON BASE EN LA ESCALA BBCH AMPLIADA.	41
CUADRO 2. FASES FENOLÓGICAS Y FECHAS POR PAÍSES.....	43
CUADRO 3. RESUMEN DE DESARROLLO Y MADURACIÓN DEL FRUTO DE ‘GEISHA ENANA’ EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.	45
CUADRO 4. RESUMEN DE LAS FASES FENOLÓGICAS DE ‘GEISHA ENANA’ EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.	46
CUADRO 5. NÚMERO DE MUESTRAS POR COLECTA.	54
CUADRO 6. TRATAMIENTOS DE FERTILIZACIÓN EN CAFÉ ‘Geisha Enana’.	55
CUADRO 7. ANÁLISIS DE SUELO DE HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA (2022).	74
CUADRO 8. TRATAMIENTOS DE FERTILIZACIÓN EN CAFÉ ‘Geisha Enana’.	76
CUADRO 9. FORMULA DE FERTILIZACIÓN AJUSTADA AL SITIO EXPERIMENTAL (CAFÉ HUITZI).	77
CUADRO 10. RENDIMIENTO DE CAFÉ CEREZA PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.....	80
CUADRO 11. RENDIMIENTO DE PERGAMINO PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.....	81
CUADRO 12. RENDIMIENTO AGROINDUSTRIAL DE CEREZA A PERGAMINO PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.	82
CUADRO 13. RENDIMIENTO AGROINDUSTRIAL DE PERGAMINO A VERDE PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.	83
CUADRO 14. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.....	84
CUADRO 15. ACTIVIDAD DE AGUA EN 100 G DE CAFÉ ORO PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.	84

CUADRO 16. ANÁLISIS FÍSICO CONSIDERANDO EL EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA' 2022 EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA.	85
CUADRO 17. RENDIMIENTO (PERGAMINO) Y TAMAÑO (Z) DEL GRANO DE CAFÉ (G) DEL CICLO 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	87
CUADRO 18. COMPARACIÓN DE MEDIAS PARA ZARANDA 19 (Z19) DEL CICLO 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	87
CUADRO 19. COMPARACIÓN DE MEDIAS PARA CALIDAD EUROPEA DEL CICLO 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	88
CUADRO 20. COMPARACIÓN DE MEDIAS PARA CALIDAD AMERICANA DEL CICLO 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	88
CUADRO 21. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE DEFECTOS PRIMARIOS PARA Z19 DEL CICLO 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	89
CUADRO 22. PORCENTAJE DE DEFECTOS Y NUMERO DE DEFECTOS DEL CICLO 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	89
CUADRO 23. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE DEFECTOS PRIMARIOS EN PREPARACIÓN EUROPEA DE 'Geisha Enana'.	90
CUADRO 24. PORCENTAJE DE DEFECTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS EN PREPARACIÓN EUROPEA Y AMERICANA DE 'Geisha Enana'.	91
CUADRO 25. PORCENTAJE DE ANORMALIDADES DEL GRANO DE LA COSECHA 2022-2023 DE 'Geisha Enana'.	92
CUADRO 26. VARIABLES FÍSICAS DEL PCA PARA CAFÉ 'GEISHA ENANA'.	94
CUADRO 27. PORCENTAJE DE ANORMALIDADES DEL GRANO DE LA COSECHA 2022-2023.	94
CUADRO 28. TEMPERATURA DE TUESTE E INDICADORES DE GRANO ORO.	95
CUADRO 29. COLOR DE GRANO MOLIDO DE 'Geisha Enana'.	97
CUADRO 30. VARIABLES PRINCIPALES DE LA CATA.	99

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DESARROLLO FENOLÓGICO POR FASES Y SUBFASES DE LA VARIEDAD ‘Geisha Enana’ EN HUITZILAN DE SERDÁN, PUEBLA EN 2022-2023.....	47
FIGURA 2. PARTE PRODUCTIVA DE LA PLANTA.....	53
FIGURA 3. FILTRADO DE LOS EXTRACTOS DE POTASIO (K) Y CALCIO (CA) DE CAFÉ ‘GEISHA ENANA’.	56
FIGURA 4. EXTRACTO PARA NITRÓGENO DE CAFÉ ‘GEISHA ENANA’.	57
FIGURA 5. REACTIVOS PARA DETERMINAR NITRÓGENO EN CAFÉ ‘GEISHA ENANA’.	58
FIGURA 6. TITULACIÓN DE LOS EXTRACTOS DE NITRÓGENO (N) PARA CAFÉ ‘GEISHA ENANA’.	59
FIGURA 7. EXTRACTO PARA DETERMINAR POTASIO (K) DE CAFÉ ‘GEISHA ENANA’.	60
FIGURA 8. ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA DEL FRUTO (MG/FRUTO) PARA ‘GEISHA ENANA’ SIGUIENDO LAS FASES FENOLÓGICAS	62
FIGURA 9. EXTRACCIÓN DE NITRÓGENO (A), POTASIO (B) Y CALCIO (C) PARA ‘GEISHA ENANA’	65
FIGURA 10. DIAGRAMA DE VARIABLES FÍSICAS EN CAFÉ ‘Geisha Enana’.	93
FIGURA 11. DIAGRAMA DE LAS VARIABLES Y TRATAMIENTOS EN EL PCA.	98

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos; Miguel Domínguez, Marvin López, Miguel A. Domínguez
y Lessly Domínguez.

A mí abuelita Guillermina.

A mis compañeros de vida y de lucha, especialmente a Erandi, Vladi, Clarita y
Mardo.

A todos ellos por ser los sembradores más raros que hubo en el monte.

A mis maestros y amigos, Dr. Eduardo Campos y Dr. Juan Ayala.

A todos ellos, gracias por ser parte de mí formación, gracias por colaborar a que
nadie tenga nunca más patria que el vecino. Que nadie diga más la finca mía, el
barco..., sino la finca nuestra, de nosotros los hombres.

Bryan

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la beca otorgada.

A Unidos por Café Huitzi S.C. de R.L. de C.V. por permitirme realizar mi tesis en sus instalaciones y por brindarme todas las facilidades para que esta investigación fuera lo más provechosa posible.

Al personal del laboratorio de “Nutrición de frutales” de la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme el equipo necesario para reducir costos de mi investigación.

A Yadira y “Chayito” por ser parte importante en mi investigación; por ayudarme en todo el trabajo de laboratorio.

Al Dr. Gustavo Almaguer Vargas por ser mi director de tesis.

Al Dr. Eduardo Campos rojas por apoyarme, orientarme, ser estricto y comprensivo durante mi estancia en la maestría y licenciatura. Por ser mi amigo.

Al Dr. Juan Ayala Arreola por acompañarme durante gran parte del trabajo de laboratorio y por orientarme. Por ser mi amigo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Bryan Alexis Domínguez López

Fecha de nacimiento: 3 de abril de 1996

Lugar de nacimiento: Huauchinango, Puebla

Profesión: Lic. En Agronomía en Horticultura Protegida

Cédula profesional: 13037259

Desarrollo académico

Bachillerato: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 110 “Profr. Luis Córdova Reyes”

Licenciatura: Licenciatura En Agronomía en Horticultura Protegida en la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

FERTILIZACIÓN Y EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL

EN LA CALIDAD DEL CAFÉ

Actualmente México ocupa el 11° lugar como productor de *Coffea arabica* L. en el ámbito mundial y, el estado de Puebla destaca entre los principales productores dentro del país, caracterizándose por su producción minifundista y por utilizar técnicas artesanales de producción, condición determinada por los productores indígenas. Por estas razones, la descripción fenológica de ‘Geisha Enana’, la obtención de un esquema fenológico, la evaluación de la aplicación de fertilizantes, químicos y orgánicos, en la calidad física y organoléptica del café y la obtención de fechas de fertilización para el municipio de Huitzilan de Serdán, son herramientas importantes al permitir la tecnificación de los procesos productivos del café: optimizan las prácticas agronómicas como fertilización y cosecha. El esquema fenológico corresponde a 38 semanas de observación de la planta de café. Para la evaluación física y organoléptica se utilizaron las normas nacionales e internacionales. La curva de extracción fue resultado de la determinación de nitrógeno (N), potasio (K) y calcio (Ca) mediante método Kjeldhal y espectrometría de emisión flama, además, se relacionaron los datos con el esquema fenológico de la variedad Geisha Enana. Los resultados mostraron que la fase de desarrollo del fruto (7) fue la de mayor duración con 175 días (de mayo a octubre). La acumulación de materia seca en los frutos fluctuó durante las distintas etapas fenológicas, con picos de acumulación durante el desarrollo del endospermo del fruto, encontrándose el pico máximo el 19/11/2022 durante la fase fenológica 81. Con relación al rendimiento, no se presentaron diferencias significativas.

Palabras Clave: ‘Geisha Enana’, fenología, desarrollo del fruto, organoléptica

GENERAL ABSTRACT

FERTILIZATION AND NUTRIENT EXTRACTION IN COFFEE QUALITY

Currently, Mexico ranks 11th in the world as a producer of *Coffea arabica* L., with state of Puebla standing out among the main producers within the country. Puebla is characterized by its smallholder production and the use of artisanal production techniques, a condition determined by indigenous producers. For these reasons, the phenological description of ‘Geisha Enana’, the development of a phenological scheme, the evaluation of the application of chemical and organic fertilizers on the physical and organoleptic quality of coffee, and the determination of fertilization dates for the municipality of Huitzilán de Serdán are important tools. These tools allow for the modernization of coffee production processes, optimizing agronomic practices such as fertilization and harvesting. The phenological scheme was obtained by observing the development of the coffee for 38 weeks. For the physical and organoleptic evaluation, national and international standards were used. The extraction curve was generated by determining nitrogen (N), potassium (K), and calcium (Ca) using the Kjeldahl method and flame emission spectrometry. Additionally, the data were related to the phenological scheme of the variety Geisha Enana. The results showed that the fruit development phase (7) was the longest, lasting 175 days, from May to October. The accumulation of dry matter in the fruits fluctuated during the different phenological stages, with peaks of accumulation during the endosperm development of the fruit, with the maximum peak observed on 11/19/2022 during phenological stage 81. Regarding yield, no significant differences were found.

Keywords: ‘Geisha Enana’, Phenology, fruit development, organoleptic quality

Thesis of Master of Science in Horticulture, Autonomus University of Chapingo.

Author: Bryan Alexis Domínguez López.

Thesis Advisor: Dr. Gustavo Almaguer Vargas.

Co-advisor: Dr. Eduardo Campos Rojas.

I. INTRODUCCIÓN

El género *Coffea* es considerado el motor económico de varios países de zonas tropicales y subtropicales del mundo, siendo el segundo producto de mayor comercialización a nivel global, sólo superado por el petróleo (Marín-Garza et al., 2018). Entre las especies del género, *C. arabica* L. es la más importante en términos comerciales, produciéndose principalmente en América Latina, África Oriental y Asia (Rizzuto & Liliana, 2014). En tanto que *C. canephora* P. es la segunda especie más relevante en términos comerciales, donde Brasil, Vietnam, Indonesia y Colombia son los principales productores y concentran el 85 % de la producción mundial (Coffee barometer, 2023); generan 156.6 millones de sacos de 60 kg (Hameed et al., 2020; Instituto Hondureño del Café, 2021).

México ocupa el 11° lugar como productor del grano a nivel mundial (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2018). En los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla se concentra el 94 % de la producción total nacional (728,878.03 t), el 84.5 % de la superficie cosechada (554,883.58 ha) y el 83 % (439,495) de todos los productores (Morales-Ramos et al., 2021; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023); caracterizándose estos, por ser minifundistas y utilizar técnicas artesanales de producción, aspecto que se explica en su mayoría por su origen indígena (Flores Vichi, 2015).

Esto genera que se tengan serios problemas relacionados con la fertilización, algunos de ellos, derivados también, de incrementos pronunciados en las temperaturas (Hernández-Sánchez & Travieso-Bello, 2021). Los incrementos en las temperaturas, proyectados en hasta 4.6 °C para el año 2080, y las precipitaciones que podrían alcanzar los 2,584 mm anuales, provocan la lixiviación de los nutrientes del suelo, que resulta en suelos con pH ácidos (< 5), presencia de Al^{2+3+} y poca presencia de fósforo (< 10 mg·kg⁻¹), además de la degradación del suelo (Noriega et al., 2014). Esta situación conduce a una mala nutrición del cultivo y, por tanto, a la obtención de bajos rendimientos y problemas en la calidad del grano (Jaramillo-Villanueva et al., 2022), tales como granos inmaduros, granos tipo concha y granos flotadores (Dilas-Jiménez et al., 2020). Este efecto impide que los productores no accedan a mercados especializados y obtengan precios diferenciados.

Al mismo tiempo, la crisis de precios de venta, la migración y baja escolaridad entre los productores indígenas agravan la situación (Hernández-Cortés, 2021) y traen consigo que estas limitantes condicionen o determinen la adopción o no de nuevas técnicas debido a sus costos de implementación o al poco entendimiento de los procesos técnicos por parte de los productores (Flores-Vichi, 2015).

Por lo que, la obtención de una curva de extracción nutrimental, relacionada con la fenología del cultivo, nos permitiría observar la acumulación de los elementos minerales por los diferentes órganos de las plantas y el estado fenológico (Sadeghian et al., 2012), que permite una mayor precisión en el manejo nutricional del cultivo y, por tanto, una optimización de los recursos económicos (Khalajabadi, 2012). Sin embargo, en México no existe ningún trabajo relacionado con café que considere todas las fases fenológicas, el efecto de la fertilización en la calidad del producto y, los que existen de otros cultivos, no consideran todas las fases fenológicas (Rodas-Gaitán et al., 2012).

Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron evaluar el efecto de fertilizantes convencionales y orgánicos en la calidad del grano del café, al tiempo que se caracterizó fenológicamente ‘Geisha Enana’. Esto Permite optimizar la aplicación de los fertilizantes y garantizar una nutrición adecuada. Además de la obtención de la curva de extracción nutrimental para realizar una fertilización adecuada a la fenología y los requerimientos.

1.1.OBJETIVOS GENERALES

- Describir la fenología, con base en la escala BBCH de ‘Geisha Enana’ para generar un esquema fenológico que permita futuras investigaciones. para la comunidad de Huitzilán de Serdán.
- Evaluar la aplicación de fertilizantes convencionales y orgánicos en la calidad física y organoléptica del grano de café utilizando la normatividad de la Specialty Coffee Association (SCA) para obtener una propuesta de fertilización que mejore, respecto a la fertilización regional, la calidad del grano y la bebida.
- Determinar las fases fenológicas de mayor demanda nutrimental con base en un esquema fenológico para obtener las mejores fechas de fertilización para el café.

1.2.OBJETIVOS PARTICULARES

- Conocer la dinámica de extracción nutrimental y acumulación de nutrimentos en los diferentes órganos de la planta de café y su relación con el desarrollo fenológico para optimizar el uso de fertilizantes y proponer fechas de fertilización.
- Realizar una propuesta de fertilización que reduzca los costos de producción utilizando el análisis de suelo y guías técnicas de nutrición para reducir los costos de producción.

1.3.HIPÓTESIS

- La acumulación de nutrimentos en todos los órganos será mayor en la fase de fructificación lo que motivará a programar la fertilización antes de esta fase fenológica.
- Al menos un tratamiento superará el rendimiento del manejo convencional.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. IMPORTANCIA MUNDIAL DEL CAFÉ

Este producto desempeña un papel importante en la generación de ingresos para los países exportadores: aportan anualmente más de 15,000 millones de dólares en 50 naciones y respaldan la creación de más de 20 millones de empleos en 80 países (Canet-Brenes & Soto-Viquez, 2017). En este contexto, los países considerados como subdesarrollados son los principales exportadores de café oro, con una tendencia al alza en sus cifras de exportación y un aumento anual en la producción del 1.8 % (Rizzuto & Liliana, 2014).

Además de su impacto económico, el cultivo de café también aporta beneficios ambientales. Su cultivo, con otras especies, contribuye a la disminución de la erosión del suelo, aumenta la presencia de arvenses y, como consecuencia, favorece un incremento en la cantidad de insectos (Agüero-Alvarado et al., 2018).

Otro aspecto relevante del café está relacionado a sus beneficios nutraceuticos. Se destaca que el café molido puede dar origen a monoisacáridos (MOS), los cuales poseen utilidad tanto en animales como en humanos debido a su efecto prebiótico (Magengelele et al., 2023). También el grano de café, gracias a su contenido de cafeína y ácido clorogénico, no sólo tiene un efecto estimulante para combatir la fatiga y la somnolencia, que mejoran el estado de alerta (Husni et al., 2022), sino que también posee efectos positivos en la prevención del cáncer (Gaascht et al., 2015).

2.2. IMPORTANCIA DEL CAFÉ EN MÉXICO

En América Latina el café representa un pilar económico (Pierre et al., 2020): genera 1.8 millones de empleos en Centroamérica, y 500,000 empleos directos y 2.5 millones indirectos en México (Morales-Ramos et al., 2021).

Además, su cultivo está establecido en 14 entidades federativas y, por su sensibilidad al cambio climático, está asociado a sistemas agroforestales y orgánicos, promoviendo la diversidad vegetal y animal (Hernández-Sánchez & Travieso-Bello, 2021). Así mismo, este cultivo está ligado a productores indígenas y de escasos recursos económicos (Calvillo-Arriola & Sotelo-Navarro, 2024).

2.3. IMPORTANCIA DEL CAFÉ EN PUEBLA

El café, uno de los principales cultivos del Estado de Puebla con 54 municipios productores, ocupa el tercer lugar a nivel nacional por su valor de producción con una superficie de 71,629 ha de las cuales 43,560 ha son cosechadas, que generan 106,992 toneladas de producción (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

En el Estado se concentra el 15.3 % de la producción nacional (Agricultura Puebla, 2022), siendo el municipio de Xicotepec el principal productor del Estado, seguido de Zihuateutla, Hueytamalco, Tlacuilotepec, Jalpan, Cuetzalan del Progreso, Tlaxco y Jopala (Agricultura Puebla, 2018). El municipio de Huitzilan de Serdán, ubicado en la región cafetalera de Zapotitlán (Morales-Ramos et al., 2021) toma relevancia debido a que es considerado como “muy marginado” y los productores de café son indígenas.

2.4. CALIDAD DEL CAFÉ

La expresión de las mejores cualidades del café se ven favorecidas por una combinación de factores como la altitud, idealmente situada entre 1,300 a 1,600 m (Puerta-Quintero, 2011); una precipitación anual mayor a 1,200 mm; pH del suelo entre 5 y 6.5; materia orgánica (MO) mayor a 8; características de la variedad y realización de prácticas culturales como la regulación de la sombra del cafetal que retrasa la maduración del fruto en aproximadamente cuatro semanas cuando es sombra profunda o moderada; edad de la planta (Morais et al., 2006); el método de beneficio (húmedo, seco y semihúmedo); y la preparación de la bebida (Pabón & Osorio, 2019). Sin embargo, la calidad del grano de café no se limita exclusivamente a sus propiedades organolépticas del grano (sabor, aroma, acidez, cuerpo) (Osorio et al., 2021), sino que también abarca las características químicas (cantidad de cafeína, lípidos, azúcares) y físicas (cantidad de granos rotos, manchados).

La calidad química del café está determinada principalmente por el contenido de cafeína y trigonelina (amargo), lípidos (fragancia y cuerpo), ácidos clorogénicos (acidez), ácidos orgánicos (acidez), sacarosa y azúcares reductores (dulzor) (Ortega & Pino, 2017; Osorio, 2021). Sin embargo, no existen intervalos estipulados basados en la composición química que permitan clasificar a un café como de alta, media o baja calidad (Febrianto & Zhu, 2023).

Los atributos físicos se refieren al aspecto visual del grano: tamaño, color, olor y forma, al considerarse el café pergamino como granos de café envueltos en el endocarpio (Osorio, 2021); café verde: granos de café maduro sin tostar (sin endocarpio) (Wu et al., 2022). En ellos se puede evaluar el contenido de humedad (10 al 12 %), actividad de agua (< 0.62) (Febrianto & Zhu, 2023), tamaño, apariencia (grano sano) y defectuoso (triángulos, caracoles, quebrados y elefantes) (Osorio, 2021).

Los atributos organolépticos del café son la fragancia, percepción de la nariz sobre el café molido (seco); aroma, percepción de la nariz de los vapores que se desprenden de una bebida caliente (Osorio et al., 2021); sabor, sensación combinada de todas sensaciones gustativas; sabor residual, duración de las cualidades positivas del sabor después de ser bebida; acidez, sensación gustativa primaria producida por la dilución de ácidos orgánicos (Escamilla-Prado et al., 2015); cuerpo, sensación táctil percibida en la boca por la presencia de sustancias insolubles, líquidas o sólidas suspendidas en la bebida (Puerta-Quintero, 2000). La evaluación de todos estos atributos mediante un panel de catadores que se basen en las normas internacionales es considerada la más eficiente para determinar la calidad en taza (Osorio, 2021).

2.5. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD FÍSICA Y ORGANOLÉPTICA DEL CAFÉ

La calidad del café abarca tanto las características del grano como las de la bebida y establecen las especificaciones del producto para su comercialización; esto asegura la satisfacción del consumidor (Puerta-Quintero, 2011). Así, la selección física del grano adquiere gran importancia. Al cumplir con granos de calidad se puede ingresar al mercado internacional y de especialidad (Monsalve-Vásquez, 2022). Sin embargo, es importante destacar que, según la Specialty Coffee Association of America (SCA) y Dilas-Jiménez et al., (2020), sólo los cafés con puntajes mayores a 83 pueden acceder a precios diferenciados, derivado de la evaluación de las características organolépticas del café por un catador.

La calidad del café en taza no sólo influye en la preferencia de los consumidores, sino que también puede mejorar el estilo de vida de los productores permitiéndoles acceder a los mercados internacionales o de especialidad trayendo esto consigo un mayor ingreso económico (Machado-Vargas & Ríos-Osorio, 2016).

En este sentido, la búsqueda para mejorar la calidad del café se refleja en la atención a detalles específicos. Por ejemplo, la eliminación de defectos como granos grandes ($> 1 \text{ cm}^2$), presencia de sustancias extrañas (piedras y granos de tierra) (Rosas-Echevarría et al., 2019). granos deformes, exceptuando la deformación natural conocida como “cacahuete”, que representa entre el 5 o 7 % del total de café cosechado para *C. arabica* y *C. canephora* (Duque-Dussán et al., 2023). Así mismo, se considera como defecto la mezcla de café robusta con café arábico, pues éste ofrece un perfil aromático más complejo, con sabores menos amargos y una mayor acidez en comparación con el café robusta (Andrade-Silva et al., 2023).

2.4. MEDICIÓN DE LA CALIDAD FÍSICA Y ORGANOLÉPTICA DEL CAFÉ

Una de las formas para evaluar la calidad física del grano es visualmente y para ello, se deben seguir las distintas normas internacionales como la Specialty Coffee Association of America (SCA); no obstante, este método es muy subjetivo, aunque es el más utilizado entre los productores (Monsalve-Vásquez, 2022).

En la SCA 2018, el manual Roast Color Classification System de 1995 y en las normas mexicanas (NMX-F-586-SCFI-2008, NMX-F-129-SCFI-2008, NMX-F-158-SCFI-2008, NMX-F-162-SCFI-2008 y NMX-F-597-SCFI-2016), se establece un procedimiento detallado para evaluar la calidad del grano que consiste en: pesar 100 g de café pergamino y, posterior a su trillado, obtener el rendimiento de pergamino a verde, que puede oscilar de 17 a 20 % (Wale-Mengistu et al., 2020). Subsecuentemente se analizan 350 g de café verde y se determina el tamaño del grano por medio de zarandas que van de 12/64" a 18/64" (Puerta-Quintero, 2013), permitiéndose un recuento < 5 defectos de categoría 2 (grano negro parcial, grano agrio parcial, pergamino, flotador, inmaduro, concha, partido, cascarilla o dañado ligeramente por insecto) y un defecto de categoría 1 (grano negro, grano agrio, cereza seca, daño por hongos, materia extraña, dañado gravemente por insectos).

Para la evaluación organoléptica primero el grano se clasifica, según las normas internacionales y mexicanas, como “estrictamente de altura” ($\geq 1,200$ m), “altura” (entre 900 y 1,200 m), “extra-prima” (entre 800 y 900 m) y “prima lavado” (< 800 m). Ya tostado el grano se hace una clasificación por medio de su color de tueste, el cual debe oscilar entre 58 y 63 en escala Gourmet Agtron y tener un grado de tueste medio (NMX-F597-SCFI-2016, 2016). Al realizar la evaluación de cada uno de los atributos del café se asignan valores que pueden ir de 0 a 10 (Wale-Mengistu et al., 2020).

2.5. FENOLOGÍA DEL CAFÉ

La fenología, entendida como la ciencia que estudia los eventos periódicos en los seres vivos y sus relaciones con el ambiente, o bien, como la ciencia que estudia los fenómenos de crecimiento vegetativo y reproductivo de las diferentes especies vegetales con relación al ambiente (Gastaudo et al., 2019), cuenta con un sistema de evaluación fenológico elaborado por el Instituto Federal de Biología, Oficina Federal de Variedades Vegetales e Industria Química (BBCH, por sus siglas en alemán). Este sistema marca subfases fenológicas al considerar que al menos un 50 % de la estructura de la planta a evaluar presente ciertas características fenológicas estipuladas en dicho sistema (Arcila-Pulgarín et al., 2001).

La comprensión de la fenología resulta esencial para la planificación y ejecución de las labores agrícolas como siembra, fertilización, cosecha y protección ante las plagas y enfermedades (Chmielewski, 2013). Por ejemplo, el estado fenológico de floración no sólo determina el número y distribución de cortes, sino que también posibilita la estimación de la curva de crecimiento del fruto, contribuyendo a prevenir daños por plagas (Ramírez-Builes, 2014). También se ha empleado para determinar la calidad fisiológica de semillas (Crasque et al., 2024), para definir los patrones de floración entre las variedades o entre las especies (Unigarro et al., 2023), para evaluar el efecto de la temperatura, los potenciales hídricos, la sombra y los sistemas de manejo en el rendimiento (Silva et al., 2019).

La duración de las fases fenológicas pueden verse afectadas por cambios climáticos, especialmente el aumento de temperatura (Morales et al., 2020). Estos cambios inciden en la aparición de nuevas enfermedades y el aumento de las ya existentes (Chaves-Barrantes & Gutiérrez-Soto, 2016); además, se afecta la época de floración al tener un efecto directo en la inducción floral que incide en las fechas de inicio y termino de las demás fases fenológicas (Fischer et al., 2020). Por ejemplo, en café ‘Garnica’, en condiciones de Colombia, la fase fenológica emergencia de la inflorescencia y desarrollo de la flor se presenta a finales de marzo y principios de abril cuando existe un déficit hídrico; en contraste, en Xalapa, Veracruz la misma fase, se presenta en mayo y concluye en agosto (García-López, 2020; Parada-Molina et al., 2020).

La escasa información disponible sobre las fases fenológicas del café en México dificulta la implementación de nuevas tecnologías y el manejo agronómico del cultivo (Chmielewski, 2013; Ramírez-Builes, 2014).

2.6. ESPECIES COMERCIALES DE CAFÉ

La especie *Coffea arabica* L. (Arabica) tiene sus orígenes en Etiopía (Girma-Adugna, 2021), mientras que *Coffea canephora* P. (Robusta) en las selvas tropicales de las tierras bajas de África Occidental y Central (Campuzano-Duque & Blair, 2022). Estas dos especies son las más importantes desde el punto de vista comercial a nivel mundial (Rojo-Jiménez & Pérez-Urria, 2014). *C. arabica* concentra el 60 % de la producción mundial (Panhueysen & Pierrot, 2014) por su capacidad adaptativa a altitudes elevadas (> 700 m) (Rojo-Jiménez & Pérez-Urria, 2014); mientras que robusta concentra el 30 % de la producción mundial por su adaptabilidad a condiciones húmedas (1,200 a 3,000 mm año⁻¹) y bajas altitudes (<700 m) (Viguera et al., 2017). El resto de la producción mundial corresponde a café liberiano (*C. liberica* M.) y café excelso (*C. excelsa* A.) (Figuerola-Hernández et al., 2015).

La popularidad de *C. arabica* se debe a que tiene menor cantidad de cafeína (1.2 %), en comparación con robusta (2.2 %), y a su calidad sensorial en taza con atributos como el aroma, dulzor, acidez, cuerpo, sabor (Agnoletti et al., 2019) y suavidad en la bebida que le confiere un mayor valor comercial (Romero et al., 2010).

2.7. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CAFÉ

El café arábigo (*C. arabica* L.) presenta autopolinización, con flores dispuestas en inflorescencias pareadas que se desarrollan de manera seriada en las axilas de las hojas de ramas plagiotrópicas (Emerick et al., 2024). Estas flores, que pueden presentar un color blanco o ligeramente rosa, presentan también cinco o seis pétalos dependiendo de la especie, genotipo y del ambiente (Suárez & Flórez Ramos, 2023). Las anteras son de un tono amarillento con textura algodonosa (Prado et al., 2019).

Cada flor está compuesta por ovarios con dos carpelos y dos óvulos, uno por carpelo, así como un endocarpo duro (Herrera-Pinilla & Cortina-Guerrero, 2013). La floración puede presentarse en dos periodos (diciembre-abril y mayo-agosto) (Suárez & Flórez Ramos, 2023).

La estructura de la planta puede ser planófila, con presencia principal de ramas plagiotrópicas, o erectófila, con predominancia de ramas ortotrópicas; además, presenta ramas, secundarias y terciarias, donde se forman entre ocho y diez yemas de edad variable en cada nudo (Flórez-Ramos et al., 2013). El fruto es clasificado como drupa indehiscente (Herrera-Pinilla & Cortina-Guerrero, 2013). La semilla es oblonga y posee una forma plano convexa, con un tamaño variable (10-18 mm de largo) y la raíz es pivotante con raíces secundarias, extendiéndose entre 70 y 105 cm del tallo principal (Flórez-Ramos et al., 2013).

Específicamente, la variedad Geisha es de porte alto (> 3 m) originaria de Geisha, Etiopía. Las bandolas de la parte superior forman un ángulo de 45° con relación al eje principal, y las bandolas de la parte media y baja forman un ángulo de 60° con relación a este (Villavicencio et al., 2021); miden entre 50 y 60 cm de largo, un diámetro del tallo principal entre 8 y 10 cm, una distancia entre rama y rama de 5 a 8 cm, una distancia entre brote y brote dentro de la bandola de entre 0.5 y 1.0 cm (Villavicencio et al., 2021). Los brotes nuevos son de color verde y la planta presenta hojas lanceoladas y entrenudos abiertos (Velásquez, 2021). Sin embargo, la variedad Geisha Enana aún no está caracterizada.

El ancho del fruto del café ‘Geisha’ (12 mm) es menor que el de otras variedades como ‘Caturra Rojo’ (15.67 mm), ‘Marsellesa’ (14 mm) y ‘Bourbón Amarillo’ (14.83 mm); sin embargo, su peso es mayor que el de estas variedades: alrededor de 2.37 g (Oscoco et al., 2020).

2.8. FERTILIZACIÓN EN LA CALIDAD DE CAFÉ

Las cantidades de nutrientes necesarias para el cultivo del café varían en función de factores diversos, tales como la densidad de plantación, el porcentaje de sombra y las condiciones del suelo (Sadeghian, 2013). Aunque, de manera general, si se consideran las distintas condiciones edafoclimáticas, se cuenta ya con intervalos de fertilización. Por ejemplo, las aplicaciones de nitrógeno (N) oscilan entre 130 y 300 kg ha⁻¹ año⁻¹, de fósforo (P) 10 a 60 kg ha⁻¹ año⁻¹, de potasio (K) 0 a 300 kg ha⁻¹ año⁻¹, de magnesio (Mg) 8 a 60 kg ha⁻¹ año⁻¹ y de azufre (S). 13 a 50 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Sadeghian, 2013).

El cultivo de café prospera en suelos con textura franca (Sadeghian, 2022) con pH entre 5 y 5.5, con presencia de 30 mg kg⁻¹ de P, 0.9 cmol kg⁻¹ de Mg y 12 mg kg⁻¹ de S (Sadeghian, 2013) y una densidad aparente entre 0.63 y 0.69 g cm⁻³ (Salamanca-J & Sadeghian-Kh, 2004).

Las comunidades microbianas del suelo relacionadas con la MO pueden afectar la calidad sensorial del café, ubicándose el intervalo óptimo entre 10 y 15 %, que al combinarse con fertilizantes químicos se pueden ajustar los nutrientes requeridos en el momento oportuno, repercutiendo directamente en su calidad (Sadeghian, 2022; Sancho et al., 2019). Otro aspecto importante es el fraccionamiento de las aplicaciones tomando en cuenta la fenología del café (Sadeghian, 2022); este fraccionamiento puede ser en cuatro aplicaciones anuales, pues se favorece el incremento del rendimiento y calidad del grano con esta práctica (Muñoz-Belalcázar et al., 2021).

Uno de los nutrientes que es requerido en mayor cantidad y durante todo el ciclo de producción de café es el N (Sadeghian, 2022). Éste puede limitar el rendimiento del cultivo en cualquiera de sus fases fenológicas (Silva & Lima, 2012), o puede tener un efecto positivo en conjunto con hierro (Fe) y molibdeno (Mo) en la acidez y balance del café en taza (Suárez Salazar et al., 2015); en la fragancia y aroma (Rosas-Arellano et al., 2008); sabores en taza (chocolates, caramelos, frutales); cuerpo (Melo-Restrepo & Piñeros, 2015), sabor y amargor (Velásquez & Banchón, 2022). La fuente de este nutriente no incide en la producción ni la calidad del café, pero debe tenerse en cuenta que algunos fertilizantes, como sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄), pueden acidificar el suelo, que afecta a futuro su disponibilidad (Sadeghian & Duque, 2019). También debe considerarse que puede estar presente en los fertilizantes con otro nutriente, como el calcio (Ca) y el P, elementos que influyen en el rendimiento, acidez del café en taza

(Burgos et al., 2014), fragancia, aroma (Márquez et al., 2020) y en la fermentación del café por estar presentes en el mucílago del grano (Poltronieri & Rossi, 2016).

El fósforo puede aplicarse con el uso de rocas fosfóricas que, además de afectar en la calidad, tiene un efecto correctivo en la acidez del suelo (Sadeghian et al., 2012); sus aplicaciones se recomiendan en la época de floración y fructificación (Sadeghian & Duque, 2019).

La aplicación de K se recomienda con cloruro de potasio (KCl) dada la concentración del nutriente en el fertilizante, sin embargo, existen otras fuentes como el sulfato doble de magnesio y potasio (2MgSO_4 y K_2SO_4) (Sadeghian & Duque, 2019). Este nutrimento es fuertemente demandado por la planta durante la fase de floración y desarrollo del fruto (Sadeghian et al., 2012) y tiene un efecto positivo en la fragancia y el aroma (Suárez-Salazar et al., 2015). También puede influir en el amargor al presentarse un exceso de dicho elemento debido a que genera un aumento de lípidos y de ácido cítrico (Velásquez & Banchón, 2022).

Otro de los elementos importantes para la producción y calidad del café es el Mg. Este nutriente es utilizado por la planta para el llenado del fruto (Sadeghian et al., 2012) e influye en la calidad del café, específicamente en el aroma (Puerta-Quintero, 2011). Se puede agregar al suelo en forma de óxido de magnesio (MgO) o sulfato de magnesio (MgSO_4) (Sadeghian & Duque, 2019).

2.9. CURVAS DE EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL

Las curvas de extracción nutrimental son una representación gráfica de la extracción de un nutriente por parte de la planta o un órgano de ella (raíz, tallo, hoja, flor o fruto) y representa las cantidades de este nutriente extraídas durante todo su ciclo de cultivo (Sadeghian-khalajabadi, 2008). La curva se determina con base en la concentración de los nutrientes en relación con el peso seco de la estructura evaluada (Quesada-Roldán & Bertsch-Hernández, 2013).

La utilidad de este tipo de estudios radica en que contribuye a dar solidez a los programas de fertilización, que ayuda a determinar la cantidad del nutriente para obtener un rendimiento deseado (Bertsch, 2005). Permite también sincronizar el suministro de fertilizantes con la fase fenológica del cultivo, la demanda y el rendimiento programado además de ayudar a reducir las pérdidas de los nutrientes del suelo (Selladurai & Awachare, 2020).

2.10. MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES NUTRIMENTALES

La determinación exacta de los nutrientes requiere de una preparación rigurosa de las muestras vegetales y cuando son muestras sólidas, tienen que ser transformadas en una solución (Mendoza et al., 2014). Para ello, puede seguirse la digestión húmeda (ácida) o seca (Untea et al., 2012). La digestión húmeda puede realizarse en una autoclave al utilizar ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄) o una mezcla de H₂SO₄:HClO y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y utilizar una temperatura de 220 °C para su digestión (Arrieche et al., 2013; Mendoza et al., 2014; Pineda-Pineda et al., 2008).

Al tener listo el extracto, los nutrientes pueden determinarse por distintos métodos. El N puede ser determinado por el método Kjeldahl que consta de tres pasos: la digestión de la muestra, destilación y determinación de amoníaco (Sáez-Plaza et al., 2013). El K y Ca pueden determinarse por medio de fotometría de emisión de llama (Sellés Marset, 2012) mientras que el P y el Mg mediante espectrometría de absorción atómica (Pineda-Pineda et al., 2008).

2.11. LITERATURA CITADA

- Agnoletti, B., Oliveira-Da silva, E. C., Pinheiro, P., & Saraiva, S. (2019). Discrimination of Arabica and conilon coffee from physicochemical properties allied to chemometrics. *Revista Virtual de Química*, 11(3), 785-805. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190057>
- Agricultura Puebla. (2018). *Puebla alcanza el tercer lugar a nivel nacional del valor de producción de café* [Gubernamental]. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-alcanza-el-3er-lugar-a-nivel-nacional-del-valor-de-produccion-de-cafe?idiom=es#:~:text=El%20valor%20del%20total%20de%20la%20producci%C3%B3n%20alcanz%C3%B3,el%204to.lugar%20a%20nivel%20nacional%20de%20superficie%20plantada.>
- Agricultura Puebla. (2022). *Cultivo de café en México*. [Gubernamental]. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/es/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico-317016?idiom=es>
- Agüero-Alvarado, R., Rodríguez-Ruiz, A. M., González-Lutz, M. I., Portuguese-García, P., & Brenes-Prendas, S. (2018). Abundancia y cobertura de arvenses bajo manejo convencional y orgánico de café y banano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 85. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.28053>
- Andrade-Silva, E. M., Lima-Castro, I. S., Pereira-Aguilar, A., Teixeira-Caixeta, E., & De Oliveira-Mendes, T. A. (2023). New genetic markers for 100% arabica coffee demonstrate high discriminatory potential for InDel-HRM-based coffee authentication. *Food Research International*, 173(2). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113424>
- Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., & Wicke, H. (2001). Aplicación de la «escala BBCH ampliada» para la descripción de las fases fenológicas del desarrollo de la planta de café (*Coffea* sp.) [Boletín Técnico]. Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE: Aplicación de la escala BBCH ampliada para la descripción de las fases fenológicas del desarrollo de la planta de café *Coffea* sp
- Arrieche, I., Aular, M., Mora, R., Castillo, L., Tovar, M. R., Martínez, A., Baptista, H., Cruz, J., Reveron, A. M., Silva, C., & Alfonzo, N. (2013). Unificación de criterios para la determinación de la materia orgánica del suelo. Estudio interlaboratorio. *Venezuelos*, 21(2). 33-42. <https://www.researchgate.net/publication/303911853>
- Bertsch, F. (2005). Estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización [Folleto]. Estudios de absorción de nutrientes como apoyo.pdf (ipni.net)
- Burgos, E. R., Cano, G. A. V., & Salazar, J. C. S. (2014). Fuentes de variación que tienen efecto sobre los atributos sensoriales de taza en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *SENNOVA* 1(1), 64-77. DOI:10.23850/23899573.85

- Calvillo-Arriola, A. E., & Sotelo-Navarro, P. X. (2024). A step towards sustainability: Life cycle assessment of coffee produced in the indigenous community of Ocoatepec, Chiapas, Mexico. *Discover Sustainability*, 5(17). <https://doi.org/10.1007/s43621-02400194-6>.
- Campuzano-Duque, L. F., & Blair, M. W. (2022). Strategies for Robusta coffee (*Coffea canephora*) improvement as a new crop in Colombia. *Agriculture, MDPI*, 12(10), Article 1576. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101576>
- Canet-Brenes, G., & Soto-Viquez, C. (2017). *Caficultura: Panorama actual en América Latina*. Biblioteca Básica de Agricultura (BBA). <http://repositorio.iica.int/handle/11324/6437>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (2018). *El café mexicano*. Cámara De Diputados. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/31El%20caf%C3%A9%20en%20M%C3%A9xico.pdf>
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2016). Respuestas al estrés por calor en los cultivos: Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Chmielewski, F. M. (2013). Phenology in Agriculture and Horticulture. En M.D. Schwartz (ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science*, 539-561. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_29
- Coffee barometer. (2023). Barómetro del café 2023. <https://coffeebarometer.org/explore-coffee-barometer/>
- Crasque, J., Brandão, T. M. D. S., Cerri, B. N., Comério, M., Volpi, P. S., de Oliveira, L. A., Machado, J. A., Dias, C. R. M., & Dousseau-Arantes, S. (2024). Physiological quality of seeds of *Coffea canephora* from early and late clones during maturation. *Bragantia*, 83, Article e20230200. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230200>
- Duque-Dussán, E., Figueroa-Varela, P. A., & Sanz-Urbe, J. R. (2023). Peaberry shape and size influence on different coffee postharvest processes. *Journal of Food Process Engineering*. Article e14461. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14461>
- Emerick, L. O. S., Lucindo, M. J. R., Ferreira, M. F. D. S., De Almeida, R. N., Ramalho, J. C., Rakocevic, M., & Partelli, F. L. (2024). Modifications in floral morphology of *Coffea* spp. genotypes at two distinct elevations. *Flora*, 310 (1). <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152443>
- Pierre, J. E., Retes-Cáliz, R. F., & Vásquez-Reyes, E. F. (2020). Importancia, genética y evolución del café en Honduras y el mundo. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 9(3), 149-155. <https://doi.org/10.5377/innovare.v9i3.10649>
- Escamilla-Prado, E., Ruiz-Rosado, O., Zamarripa-Colmenero, A., & González-Hernández, V. A. (2015). Calidad en variedades de café orgánico en tres regiones de México. *Revista de Geografía Agrícola*, 55 (1), 45-55. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2015.55.004>

- Febrianto, N. A., & Zhu, F. (2023). Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. *Food Chemistry*, 412, Article 135489. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135489>
- Figueroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., & Godínez-Montoya, L. (2015). *La producción y el consumo del café*. ECORFAN-Spain. https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf
- Fischer, G., Parra-Coronado, A., & Balaguera-López, H. E. (2020). Aspectos del cultivo y la fisiología de la feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret). Una revisión. *Ciencia y Agricultura*, 17(3), 11-24. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11386>
- Flores Vichi, F. (2015). La producción de café en México: Ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 4(7), 174-194. <https://doi.org/10.31644/IMASD.7.2015.a07>
- Flórez-Ramos, C. P., Ibarra-Ruales, L. N., Gómez-Gil, L. F., Carmona-González, C. Y., Castaño-Marín, Á., & Ortiz, A. (2013). Estructura y funcionamiento de la planta de café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1, 123-168. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_08
- Gaascht, F., Dicato, M., & Diederich, M. (2015). Coffee provides a natural multitarget pharmacopeia against the hallmarks of cancer. *Genes & Nutrition*, 10(6). <https://doi.org/10.1007/s12263-015-0501-3>
- García-López, J. C. (2020). Cambios en sistemas productivos y elementos biofísicos, en fincas cafeteras de la zona central colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 21-38. <https://doi.org/10.38141/10778/71202>
- Gastaudo, J., Anibalini, V. A., & Coronel, A. (2019). Determination of the bioclimatic index of *Erythrina crista-galli* and *handroanthus heptaphyllus* in the south of Santa Fe province (Argentina). *Revista de Investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias*.13-19 <https://doi.org/10.35305/agro33.263>
- Girma-Adugna, B. (2021). Factors affecting coffee (*Coffea arabica* L.) quality in ethiopia: A review. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(5), 283-291. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20210905.12>
- Hameed, Z., Khan, I. U., Islam, T., Sheikh, Z., & Naeem, R. M. (2020). Do green HRM practices influence employees' environmental performance? *International Journal of Manpower*, 41(7), 1061-1079. <https://doi.org/10.1108/IJM-08-2019-0407>
- Hernández-Cortés, S. (2021). *Un futuro amenazante para el café colombiano: Efectos del cambio climático sobre la fisiología y ecología de coffea arabica. Una revisión* [Trabajo de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio del Campos de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/53616>

- Hernández-Sánchez, M. I., & Travieso-Bello, A. C. (2021). Medidas de adaptación al cambio climático en organizaciones cafetaleras de la zona centro de Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. <https://www.academia.edu/115141523>
- Herrera-Pinilla, J. C., & Cortina-Guerrero, H. A. (2013). Taxonomía y clasificación del café [Manual]. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_07
- Husni, M. A., Nugroho, A. K., Sulaiman, T. N. S., & Fakhrudin, N. (2022). Microencapsulation of green Coffee beans (*Coffea canephora*) extract using whey protein concentrate. *Iraqi Journal of Pharmaceutical Sciences*, 31(1), 20-31. <https://doi.org/10.31351/vol31iss1pp20-31>
- Instituto Hondureño del Café (2021). Informe estadístico 2020-2021. <https://www.ihcafe.hn/wp-content/uploads/2022/02/Resumen-Informe-2020-2021.pdf>
- Jaramillo-Villanueva, J. L., Guerrero-Carrera, J., Vargas-López, S., & Bustamante-González, Á. (2022). Percepción y adaptación de productores de café al cambio climático en Puebla y Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). Article e3170. <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3170>
- Machado-Vargas, M. M., & Ríos-Orsorio, L. A. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: Revisión sistemática. *IDESIA*, 34(2), 15-23. <https://doi.org/10.4067/S0718-342920160050000002>
- Magengelele, M., Malgas, S., & Pletschke, B. I. (2023). Bioconversion of spent coffee grounds to prebiotic manooligosaccharides an example of biocatalysis in biorefinery. *RSC Advances*, 13(6), 3773-3780. <https://doi.org/10.1039/D2RA07605E>
- Marín-Garza, T., Gómez-Merino, F. C., Aguilar-Rivera, N., Murguía-González, J., Trejo-Téllez, L. I., Pastelín-Solano, M. C., & Castañeda-Castro, O. (2018). Composición bioactiva de hojas de café durante un ciclo anual. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(4), 365-372. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.365-372>
- Márquez, F. R., Quispe, P., Molleapaza, N., Cabrera, S., & Peña, J. (2020). Relationship between soil characteristics and altitude with the sensory quality of coffee grown under agroforestry systems in Cusco, Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 529-536. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.08>
- Melo-Restrepo, E. B., & Piñeros, J. B. R. (2015). Evaluación de la fertilización edáfica en café (*Coffea arabica* L.) mediante el análisis sensorial y características físicas bajo diferentes alturas en Fusagasugá-Cundinamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/1470>

- Mendoza, B., Parra, L. M. M., Almaraz, L., & Rodríguez, V. (2014). Evaluación de dos métodos de digestión ácida en el análisis de tejido foliar de caña (*Saccharum officinarum* L.). *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 9-20. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5070240>
- Monsalve-Vásquez, M. (2022). Eficacia de sistemas expertos en la selección de granos de café (*Coffea arabica*): Una revisión sistemática. *Amazonía Digital*, 1(1). <https://doi.org/10.55873/rad.v1i1.163>
- Morais, H., Caramori, P. H., Ribeiro, A. M. D. A., Gomes, J. C., & Koguchi, M. S. (2006). Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(5), 763-770. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500007>
- Morales, E. R., Chávez, S. Q., Veneros, J. G., Díaz, E. O., Sánchez, T. S., & García, M. Rosero., (2020). Efectos del cambio climático en fincas cafetaleras: Una revisión bibliográfica con énfasis en Perú. *Revista de Investigación Apuntes Universitarios*, 11(1), 55-71. <https://doi.org/10.17162/au.v11i1.547>
- Morales-Ramos, V., Escamilla-Prado, E., Muñoz-Rodríguez, M., Velázquez Morales, J. A., & Spinoso-Castillo, J. L. (2021). *Perfiles de calidad del café de México*. Biblioteca Básica de Agricultura (BBA).
- Muñoz-Belalcázar, J. A., Benevides-Cardona, C. A., Lagos-Burbano, T. C., & Criollo-Velázquez, C. P. (2021). Manejo agronómico sobre el rendimiento y la calidad de café (*Coffea arabica*) variedad Castillo en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 750-763. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.44403>
- NMX-F597-SCFI-2016. (2016). Café verde: Especificaciones, preparaciones y evaluación sensorial. <http://economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-597-scfi-2016.pdf>
- Noriega, G., Cárcamo, B., Gómez, M. Á., Schwentesius, R., Cruz, S., Leyva, J., García, E., López, U., & Martínez, A. (2014). Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: Caso café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 163-169.
- Ortega, A., & Pino, J. (2017). Revisión de publicaciones relacionadas con el aroma del café durante 1960-2016. *Ciencia y tecnología de alimentos*, 27(3), 37-41. <https://revcitecal.iiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/115>
- Oscoco, I. M., Roldán, E. P. C., Quispe, E. Murga., Camacho, A. V., Marmolejo G., D., & Marmolejo G., K. J. (2020). Selección, identificación y zonificación de café (*Coffea arabica* L.) por su adaptabilidad, rendimiento, calidad sensorial y resistencia a plagas y enfermedades. *Agroindustrial Science*, 10(3), 249-257. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.03.05>
- Osorio, V. (2021). *La calidad del Café* [Folleto]. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4290>
- Osorio, V., & Pabón, J. (2022). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la calidad sensorial del café. *Revista Cenicafé*, 73(1), Article e73102. <https://doi.org/10.38141/10778/73102>

- Osorio, V., Pabón, J., Calderón, P. A., & Imbachi, L. C. (2021). Calidad física, sensorial y composición química del café cultivado en el departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 72(2), Article e72202. <https://doi.org/10.38141/10778/72201>
- Panhueysen, S., & Pierrot, J. (2014). *Barometro de cafe 2014*. Hivos. <http://hivos.org/coffee/>
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., & Cerdán-Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: Caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Ingeniería y Región*, 24, 61-71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Pabón, J. P. U. , & Osorio, V. P. (2019). *Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café* [Folleto]. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream>
- Pineda-Pineda, J., Avitia-García, E., Castillo-González, A. M., & Valdez-Aguilar, L. A. (2008). Extracción de macronutrientes en frambueso rojo. *Terra latinoamericana*. 26(4), 8. Extracción de macronutrientes en frambueso rojo (scielo.org.mx)
- Poltronieri, P., & Rossi, F. (2016). Challenges in specialty coffee processing and quality assurance. *MDPI*, 7(2), 19. <https://doi.org/10.3390/challe7020019>
- Prado, S. G., Collazo, J. A., Stevenson, P. C., & Irwin, R. E. (2019). A comparison of coffee floral traits under two different agricultural practices. *Scientific Reports*, 9(1), 7331. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43753-y>
- Puerta-Quintero. (2011). *Composición química de una taza de café* [Folleto técnico]. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/340>
- Puerta-Quintero, G. I. (2000). *Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida* [Folleto técnico]. <https://cenicafe.org/es/publications/avt0276.pdf>
- Quesada-Roldán, G., & Bertsch-Hernández, F. (2013). Obtención de la curva de extracción nutricional del híbrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana*, 31(1), 1-7. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57327411001>
- Ramírez-Builes, V. H. (2014). *La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones* [Folleto técnico]. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0441.pdf>
- Rizzuto, Q., & Liliana, M. (2014). El mercado mundial del café: Tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad. *Visión General*, (2), 291-307. <https://biblat.unam.mx/hevila/Visiongerencial/2014/no2/7.pdf>
- Rodas-Gaitán, H. A., Rodríguez -Fuentes, H., Ojeda-Zacarías, Ma. del C., Vidales-Contreras, J. A., & Luna-Maldonado, A. I. (2012). Curvas de absorción de macronutrientes en calabacita italiana (*Cucurbita pepo* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(5), 57. https://doi.org/10.35196/rfm.2012.Especial_5.57
- Rojó-Jiménez, E., & Pérez-Urria, E. (2014). Café I (*G. Coffea*). *REDUCA*, 7(2), 113-132. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/27030672-4b74-4df3-8a7b-eee39b14d1a2/content>

- Romero, J. V., Camayo-Vélez, G. C., González-Martínez, L. F., Cortina-Guerrero, H. A., & Herrera-Pinilla, J. C. (2010). Caracterización citogenética y morfológica de híbridos interespecíficos entre *C. arabica* y las especies diploides *C. liberica* y *C. eugenioides*. 61(3), 206-221. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(03\)206-221.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(03)206-221.pdf)
- Rosas-Arellano, J., Escamilla-Prado, E., & 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. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57313051010.pdf>
- Rosas-Echevarría, C., Solís-Bonifacio, H., & Cerna-Cueva, A. (2019). Efficient and low-cost system for the selection of coffee beans: An application of artificial vision. *Scientia Agropecuaria*, 10(3), 347-351. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.04>
- Ruiz-Nájera, R. E., Medina-Meléndez, J. A., Gómez-Castañeda, J. C., Sánchez-Yáñez, J. M., Gómez-Alfaro, G., & Pinto-Molina, O. (2016). Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 10(2), 33-43. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v10i2.550>
- Sadeghian, S. (2012). *Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (Coffea arabica L.) en la etapa de almácigo*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8983/16077856.2012.pdf?sequence=1>
- Sadeghian, S., Muñoz, B. M., & Osorio, H. G. (2012). Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en los frutos de café (*Coffea arabica* L.). *Cenicafé*, 63(1), 7-12. <https://www.cenicafe.org/es/publications/1.Acumulacion.pdf>
- Sadeghian, S. (2013). *Nutrición de cafetales*. En *Federación Nacional de Cafetaleros de Colombia, Manual del cafetalero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (3.^a ed., Vol. 2). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_7
- Sadeghian, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. (1.^{ra} ed.). Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>
- Sadeghian, S., & Duque, H. O. (2019). *Fertilizantes minerales para café en Colombia Consideraciones técnicas* [Folleto]. <https://doi.org/10.38141/10779/0503>
- Sadeguian-khalajabadi, S. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia* [Folleto]. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/587/1/032.pdf>
- Sáez-Plaza, P., Navas, M. J., Wybraniec, S., Michałowski, T., & Asuero, A. G. (2013). An overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. Part II. Sample preparation, working scale, instrumental finish, and quality control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(4), 224-272. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751787>

- Salamanca-J, A., & Sadeghian-Kh, S. (2004). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *CENICAFÉ*, 56(4), 381-397. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/163/1/arc056%2804%29381-397.pdf>
- Sancho, E. B., Espinoza, D. B., & Aguirre, D. R. (2019). El efecto de la fertilización mineral, orgánica y mineral-orgánica sobre las características agroproductivas en plantas de café y de la calidad de taza. *Universidad en Diálogo: Revista de Extensión*, 9(2), 175-185. <https://doi.org/10.15359/udre.9-2.9>
- Selladurai, R., & Awachare, C. M. (2020). Nutrient management for avocado (*Persea americana miller*). *Journal of Plant Nutrition*, 43(1), 138-147. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659322>
- Sellés Marset, M. (2012). *Variaciones de los cationes solubles en plantas de dos áreas (Bétera-tuejar) que presentan dos tipos de suelo distintos (regosol-gipsisol) y un gradiente climático* [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/17650>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. <https://www.gob.mx/siap/documentos/reporte-mensual-de-escenarios-de-18-productos-agroalimentarios-2023>
- Silva, B. M., Oliveira, G. C., Serafim, M. E., Silva, É. A., Guimarães, P. T. G., Melo, L. B. B., Norton, L. D., & Curi, N. (2019). Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. *Soil and Tillage Research*, 189, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.016>
- Silva, S. D. A., & Lima, J. S. D. S. (2012). Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. *Revista Ceres*, 59(2), 271-277. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200017>
- Suárez, J. C. A., & Flórez Ramos, C. P. (2023). Identification of sources of male sterility in the Colombian Coffee Collection for the genetic improvement of *Coffea arabica* L. *PLOS ONE*, 18(9), Article e0291264.
- Suárez Salazar, J. C., Rodríguez Burgos, E., & Duran Bautista, E. H. (2015). Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. *Acta Agronómica*, 64(4), 342-348. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.44641>
- Unigarro, C. A., Imbachi, L. C., Darghan, A. E., & Flórez-Ramos, C. P. (2023). Quantification and Qualification of Floral Patterns of *Coffea arabica* L. in Colombia. *Plants*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183332>
- Untea, A., Criste, R. D., & Vladescu, L. (2012). Development and validation of a microwave digestion – FAAS procedure for Cu, Mn and Zn determination in liver. *Revista Chimie*, 63(4), 341-346. https://www.researchgate.net/publication/259659074_Development_and_Validation_of_a_Microwave_Digestion_-_FAAS_Procedure_for_Cu_Mn_and_Zn_Determination_in_Liver

- Velásquez, R. (2021). *Guía de variedades de café y selección de semilla* [Folleto]. <https://www.anacafe.org/uploads/file/4f91ff8c819a44548ce5f54900fb4e88/Guia-variedades-y-seleccion-semilla.pdf>
- Velásquez, S., & Banchón, C. (2022). Influence of pre-and post-harvest factors on the organoleptic and physicochemical quality of coffee: A short review. *Journal of Food Science and Technology*, 60 (10), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05569-z>
- Viguera, B., Martínez-Rodríguez, R., Donatti, C., Harvey, C., & Alpízar, F. (2017). *Impactos del cambio climático en la agricultura de Centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación* [Manual]. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9476/Impactos_del_cambio_climatico_modulo2.pdf?sequence=1
- Villavicencio, A. A., Quevedo, J., & García, R. (2021). Análisis de la relación genotipo ambiente en el establecimiento de seis variedades de café en la granja experimental Santa Inés. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9 (1), 96-107.
- Wale-Mengistu, M., Alemayehu-Workie, M., & Sualeh-Mohammed, A. (2020). Physical and cup quality attributes of Arabica Coffee (*Coffea arabica* L.) varieties grown in highlands of Amhara region, Northwestern Ethiopia. *International Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1155/2020/6420363>
- Wu, H., Gu, J., Amrit, B. K., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. (2022). Effect of processing on bioaccessibility and bioavailability of bioactive compounds in coffee beans. *Food Bioscience*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101373>

III. DESCRIPCIÓN DE LAS FASES FENOLÓGICAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) ‘Geisha Enana’

RESUMEN

El café (*Coffea arabica* L.). en México representa una fuente importante de ingreso por concepto de exportación, además, desempeña un papel fundamental en la creación de empleos para más de 3 millones de personas, principalmente indígenas. A pesar de su significativa importancia, la producción de café en México sigue siendo en gran medida artesanal, limitada por la falta de tecnificación y recursos de los productores. En este contexto, el estudio de la fenología del café en el municipio de Huitzilan de Serdán, Puebla, se presenta como una herramienta importante al permitir la optimización de prácticas agronómicas como podas, fertilización y cosecha. El objetivo de este estudio fue describir la fenología general del cultivar Geisha Enana como base para futuras investigaciones. Para este fin, se utilizó la escala BBCH. Los resultados mostraron que la fase desarrollo del fruto (7) fue la de mayor duración con 175 días; que abarcan meses de julio, agosto y septiembre. La fase 8, subfase 8 (el fruto está completamente rojo) se alcanza a los 250 días, difiriendo por 10 días con la escala oficial (BBCH). Este estudio es una referencia para futuras investigaciones fenológicas en México.

Palabras clave: floración, desarrollo del fruto, café, cosecha.

ABSTRACT

DESCRIPTION OF THE PHENOLOGICAL STAGES OF COFFEE (*Coffea arabica* L.) ‘Geisha Enana’

Coffee (*Coffea arabica* L.) represents a significant source of income through export in Mexico and plays a crucial role in creating jobs for over 3 million people, primarily indigenous. Despite its significant importance, coffee production in Mexico remains largely artisanal, limited by the lack of technology and resources among producers. In this context, the study of coffee phenology in the municipality of Huitzilán de Serdán, Puebla, serves as an important tool for optimizing, and harvesting. The objective of this study was to describe the general phenology of the ‘Geisha Enana’ cultivar as a basis for future research. For this purpose, the BBCH scale was used. The results showed that the fruit development phase (7) was the longest, lasting 175 days, covering the months of July, August, and September. Phase 8, sub-phase 8 (the fruit is fully red) is reached at 250 days, differing by 10 days from the official scale (BBCH). This study serves as a reference for future phenological researches in Mexico.

Keywords: flowering, fruit development, harvest

3.1. INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica* L.) es un recurso de gran importancia económica en diversas regiones tropicales-subtropicales del mundo y es el segundo producto más comercializado a nivel mundial, sólo superado por el petróleo (Figueroa-Hernández et al., 2015). México ocupa el 11° lugar en la producción global del café (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2018); donde los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla y Oaxaca son los principales productores al contribuir significativamente en la producción nacional en 2021, con 775,402.15 t producidas por el 83 % de los productores del país (439,495) (Morales-Ramos et al., 2021).

Además, este cultivo no sólo tiene un impacto económico sustancial; genera alrededor de 900 millones de dólares en exportaciones y cerca de 1,600 millones de dólares en el mercado interno, sino que también la base de su producción está conformada por productores indígenas y minifundistas que utilizan métodos de producción tradicional (Figueroa-Hernández et al., 2015; Flores-Vichi, 2015).

Dada su relevancia económica y social, es importante comprender correctamente la fenología del café para planificar y llevar a cabo las labores de campo como la siembra, la fertilización, la cosecha y protección fitosanitaria; labores que representan gran parte de los egresos de los productores (Chmielewski, 2013). Además, la caracterización fenológica sirve como base para investigaciones más profundas, como la relación entre el desarrollo del cultivo y la extracción de nitrógeno (N); el efecto de los gradientes altitudinales y las interacciones entre fenología y presencia de plagas (Whittaker et al., 2024); las condiciones climáticas y las variaciones en el desarrollo de la planta (Chaves-Barrantes & Gutiérrez-Soto, 2016; Fischer et al., 2020). También permite diferenciar variedades según su desarrollo bajo diferentes condiciones climáticas y definir zonas de producción (Unigarro et al., 2023), evaluar la adaptabilidad del café a distintas zonas para generar estimaciones de épocas de cosecha (Kath et al., 2023). Sin embargo, en México, la información sobre las fases fenológicas de café es escasa (Morales et al., 2020), lo que dificulta la adopción de nuevas tecnologías (Ramírez-Builes, 2014).

Por lo tanto, el estudio de la fenología del café se vuelve indispensable. El objetivo de este trabajo fue emplear la Escala BBCH ampliada (Arcila-Pulgarín et al., 2001), para determinar la fenología general del cultivar regionalmente conocido como ‘Geisha Enana’ en la comunidad de Huitzilán de Serdán, Puebla.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. MATERIAL VEGETAL, DISEÑO Y SITIO EXPERIMENTAL

El estudio se realizó del 12 de abril del 2022 al 3 de enero del 2023 en el municipio de Huitzilán de Serdán, Puebla, perteneciente a la región cafetalera de Zapotitlán, cuya extensión comprende de los paralelos 19° 51' 00" a los 21° 10' 00" de LN y de los 97° 36' 18" a los 97° 51' 00" de LO y presenta una temperatura promedio anual de 18.5 °C, precipitación media de 2,142 mm anuales y un promedio de 140 días lluviosos y 24 días con niebla al año (Morales-Ramos et al., 2021).

El tipo de suelo donde se llevó a cabo el experimento presentó un pH de 4.8 y 8.7 % de MO. La variedad evaluada fue Geisha Enana y se encontraba en su segundo año de producción con un manejo tradicional que consta de deshierbes manuales, fertilización tres veces al año con la fórmula 19-4-19-3 Mg-2 S-12 B-1 Zn, y podas de saneamiento en los meses de junio, julio o agosto. La distribución espacial del experimento consideró las diversas condiciones visuales de suelo y pendiente presentes en la zona de estudio.

El diseño experimental utilizado fue bloques completamente al azar. Se emplearon 30 plantas de café ‘Geisha Enana’ (*Coffea arabica* L.) distribuidas en seis bloques con cinco plantas cada uno.

3.2.2. FASES FENOLÓGICAS

La escala fenológica BBCH que se utilizó es una propuesta ampliada por CENICAFÉ. En ella se presenta la descripción para un rango promedio de condiciones ambientales favorables al crecimiento del café en Colombia. Estos intervalos van de 17 a 23°C (promedio de temperatura día-noche), precipitación mínima de 120 mm anuales y menos de 13.5 h de fotoperiodo (Arcila-Pulgarín et al., 2001).

El rango de temperatura del sitio experimental oscila entre los 16 y los 22 °C y la precipitación entre 1,400 y 2,000 mm; presentándose un clima semicálido húmedo con lluvias todo el año (59.14 % del territorio) y templado húmedo con lluvias todo el año (40.86 % del territorio) (INEGI, 2010).

En el presente estudio, se caracterizaron cuatro etapas fenológicas: emergencia de la inflorescencia y desarrollo de la flor (5), floración (6), desarrollo del fruto (7), maduración del fruto y semilla (8). Cada una de estas fases se define mediante un número principal, y dentro de cada una se identifican subfases numeradas del 1 al 9, por ejemplo, la fase ‘floración’ (6) presenta la subfase 1; cerca del 10 % de las flores en una planta están abiertas.

Se realizaron observaciones semanalmente entre las siete de la mañana y 12 del mediodía. Se tomaron cuatro fotografías de cada una de las 30 plantas seleccionadas, cubriendo los cuatro puntos cardinales y la parte media de la planta, de acuerdo con la metodología de Sadeghian (2013). Para determinar una fase fenológica, se estableció que al menos el 50 % de las plantas debían estar en esa fase (Enz & Dachler, 1997) y, para determinar la subfase debían cumplir con el porcentaje estipulado en la adaptación de la escala BBCH (Cuadro 1) (Arcila-Pulgarín et al., 2001).

Cuadro 1. Escala fenológica para café con base en la escala BBCH ampliada.

Fase fenológica 5: Emergencia de la inflorescencia y desarrollo de la flor.	
51	Hinchamiento de la axila foliar.
53	Yemas de la inflorescencia surgen entre las estípulas, aparecen cubiertas por un mucílago de color castaño y no se observan botones florales.
54	Los botones adheridos entre sí, todavía sin abrir, que emergen en una inflorescencia multifloral.
57	Los botones alcanzan un tamaño de 4 a 6 mm. Se observan libres y aún verdes.
59	Pétalos, todavía cerrados, presentan un color blanquecino.
Fase fenológica 6: Floración.	
61	Cerca del 10 % de las flores en una planta están abiertas.
65	Aproximadamente el 50 % de las flores abiertas.
69	Cerca del 90 % de las flores han abierto y el amarre del fruto es la fase predominante.
Fase fenológica 7: Desarrollo del fruto.	
70	Los pétalos se marchitan y caen. Se hacen visibles frutos pequeños y amarillentos.
71	Los frutos crecen lentamente (“cabeza de alfiler”).
73	Crecimiento rápido. Aumenta el volumen del fruto. Presenta un color verde claro, su contenido es líquido y ha alcanzado 30 % de su desarrollo.
77	Frutos con un color verde intenso y el contenido de la semilla se solidifica.
79	Frutos de color verde pálido. Madurez fisiológica.
Fase fenológica 8: Maduración del fruto y de la semilla.	
81	Comienza a cambiar de color verde a amarillo.
85	Los frutos presentan tonalidades amarillas y rojas.
88	Fruto de color completamente rojo.
89	El fruto comienza a tornarse rojo oscuro. Comienza a secarse.

Fuente: Arcila-Pulgarín et al., 2001.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El formato de los reportes fenológicos es muy variado, se presenta en fases o en etapas, pero coinciden todos en la generalidad. En el presente estudio se utilizó un formato basado en la escala BBCH que contempla fases y subfases fenológicas.

El perfil fenológico del cultivar Geisha Enana en Huitzilan de Serdán, Puebla, tuvo una duración de 266 días hasta alcanzar la fase 88 (fruto completamente rojo; 3 de enero); cifra que difiere con los 240 días indicados en la escala BBCH ampliada. Comparativamente, se observó que ‘Geisha Enana’ en Huitzilan de Serdán presentó una mayor duración en su ciclo fenológico en comparación con la variedad ‘Garnica’ en otras regiones como Coatepec, Veracruz, con una duración de 38 semanas (266 días) y 36 semanas (252 días), respectivamente, desde la floración hasta el inicio de la cosecha (Parada-Molina et al., 2020). Destaca que la fase de mayor duración es “desarrollo del fruto” (7), que abarcó un periodo de 175 días.

De esta forma encontramos que la fase 59, emergencia de la inflorescencia y desarrollo de la flor, se presentó el 12 de abril del 2022, dando como resultado una duración de 11 días. Los mismos resultados se muestran en Xalapa, Veracruz, durante el mismo periodo. La Jamaica Agricultural Commodities Regulatory Authority (JACRA) indica fechas similares a lo señalado para México, que corresponde a las zonas bajas (<1,000 m) (Cuadro 2). De manera general, JACRA reporta resultados fenológicos con una duración total de 248 días, en contraste con los 266 días obtenidos en este análisis.

Cuadro 2. Fases fenológicas y fechas por países.

País	Fase fenológica	Meses	Fecha (s)
México (Huitzilan)	5	< 1	abril
	6	< 1	abril
	7	5	mayo-octubre
	8	4	noviembre-marzo
México (Xalapa)	5	< 2	febrero-abril
	6		
	7	7	abril-noviembre
	8	3	diciembre-marzo
Colombia	5	2	diciembre-febrero
	6	< 1	marzo-abril
	7	3	abril-julio
	8	3	agosto-noviembre
Brasil	5	2	julio-agosto
	6		
	7	6	septiembre-marzo
	8	2	abril-junio
Jamaica	5	2	abril-mayo
	6	4	mayo-agosto
	7		
	8		agosto-febrero

Al considerar un cambio de altitud en $\pm 1,000$ m, como en el estudio de García-López (2020), la fase 5 se presentó en diciembre y concluyó en febrero o principios de marzo. Estas fechas coincidieron con el segundo periodo de floración en Colombia, presentes en verano e invierno, mientras que en México ocurrieron en invierno y primavera (Ramírez-Builes, 2014). Por otro lado, en Brasil, esta misma fase se presentó entre los meses de julio y agosto (invierno), dado que su ocurrencia sucede después de días cortos y un aumento del potencial hídrico del suelo (Leite-Torres et al., 2021; Paes & Paes, 2001).

En México, para el 30 de abril del 2022, predominó la fase 69; la duración fue de 6 días, con resultados similares con lo encontrado para Xalapa, Veracruz, y Colombia. Por otro lado, para Brasil, en comparación con nuestro estudio, existe una diferencia de cuatro meses (julio-agosto) y, en comparación con Jamaica, un mes (mayo). Estas diferencias en tiempo son atribuibles a los días cortos (< 12 horas luz), a la estación seca de Brasil, a las condiciones de temperatura y a la altitud de Jamaica (Leite-Torres et al., 2021). Sin embargo, en las zonas medias, este periodo se extiende hacia los meses de abril y mayo, ajustandose a los meses de nuestro estudio.

En Huitzilán de Serdán, Puebla la fase 7 (desarrollo del fruto) inició el 7 de mayo del 2022 y concluyó el 29 de octubre del mismo año (con una duración de 175 días) (Cuadro 3). Esto difiere con lo encontrado por Parada-Molina (2020), quien reportó una duración de 180 días para esta fase; 5 días de diferencia con lo encontrado en este estudio. García-López (2020) en Colombia, indicó esta fase para abril y julio. En Sao Paulo, Brasil, Leite-Torres et al. (2020) y López et al. (2021) observaron que esta fase ocurre de septiembre a marzo, sin embargo, en otras regiones de este mismo país se observa entre enero y marzo (Paes & Paes, 2001), los que significa una diferencia de tres meses. En Jamaica esta fase inicia en mayo y concluye en julio y agosto, teniendo una duración menor de 60 días en comparación al presente estudio.

Cuadro 3. Resumen de desarrollo y maduración del fruto de ‘Geisha Enana’ en Huitzilan de Serdán, Puebla.

Fase	Subfase	Descripción	Inicio	Final	Duración en días
7	0	Los pétalos se marchitan y caen. Se hacen visibles frutos pequeños y amarillentos.	7-05-22	14-05-22	7
7	1	Los frutos crecen lentamente (“cabeza de alfiler”).	14-05-22	7-06-22	24
7	3	Crecimiento rápido. Aumenta el volumen del fruto. Presenta un color verde claro, su contenido es líquido y ha alcanzado 30 % de su desarrollo.	7-06-22	13-07-22	36
7	7	Frutos con un color verde intenso y el contenido de la semilla se solidifica.	13-07-22	24-09-22	73
7	9	Frutos de color verde pálido. Madurez fisiológica.	24-09-22	29-10-22	35
8	1	Comienza a cambiar de color verde a amarillo.	29-10-22	19-11-22	26
8	5	Los frutos presentan tonalidades amarillas y rojas.	19-11-22	26-12-22	37
8	8	Fruto de color completamente rojo.	26-12-22	28-01-23	33

En el presente estudio, la fase 8 (maduración del fruto y semilla) duró 59 días; comenzó el 5 de octubre del 2022 y concluyó el 3 de enero del 2023 con la primera cosecha regional conocida como “buena”. Esta fase se extendió por 11 días en comparación con lo indicado por Parada-Molina (2020). Por otro lado, en Jamaica, país con el que existen menos diferencias en las fases fenológicas, se desarrolló a inicios de agosto y concluyó en febrero. Las diferencias en fechas entre los países puede deberse a las diferencias en la evapotranspiración, dado que esta fase está fuertemente ligada a dicho fenómeno (Paes & Paes, 2001), sin embargo, no fue una variable estudiada.

En Huitzilan de Serdán, Puebla, entre la fase 6, subfase 9, hasta la fase 8, transcurrieron 248 días, una diferencia de 8 días con respecto al mismo período de fases que reportó Arcila et al., (2001). A diferencia de Parada-Molina (2020), desde la floración hasta fin de la cosecha, que él reporta con una duración de 42-45 semanas, nuestro estudio encontró que este período transcurre en 40 semanas (Cuadro 4 y Figura 1).

Cuadro 4. Resumen de las fases fenológicas de ‘Geisha Enana’ en Huitzilan de Serdán, Puebla.

Emergencia de la inflorescencia y desarrollo de la flor (59)	Floración (69)	Desarrollo del fruto (71-79)	Maduración del fruto y la semilla (81-88)	Días totales acumulados
12/04-23/04 (11 días)	30/04-6/05 (6 días)	7/05-29/10 (175 días)	5/11-03/01 (59 días)	03/01 (266 días)

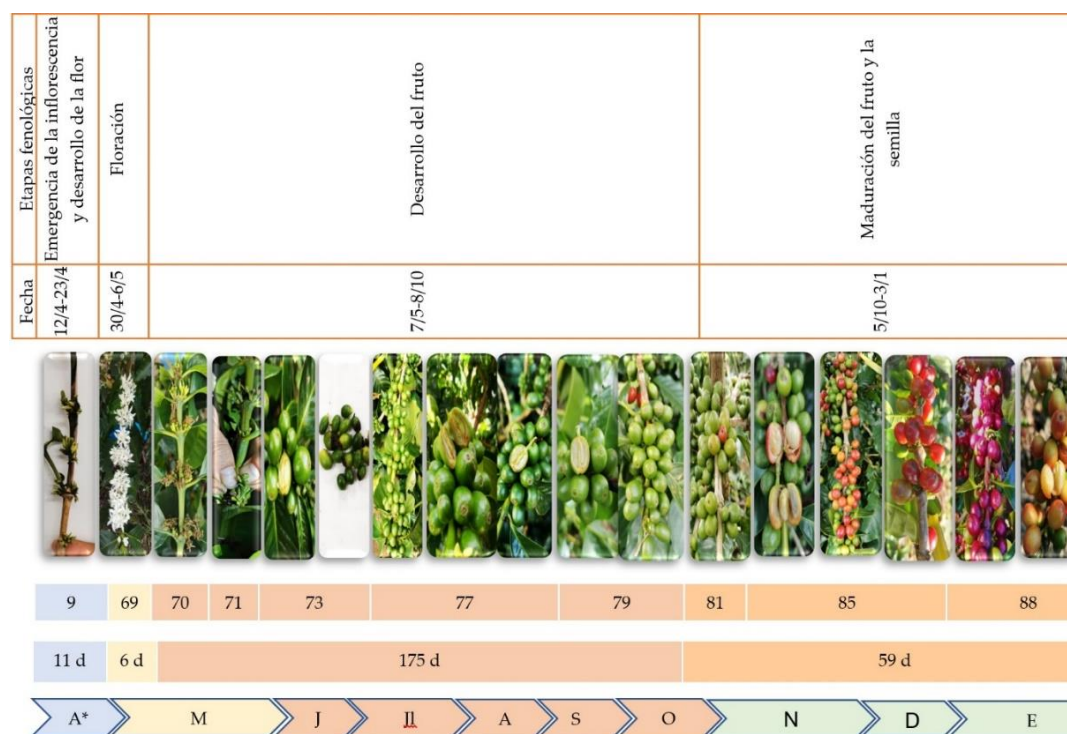


Figura 1. Desarrollo fenológico por fases y subfases de la variedad Geisha Enana en Huitzilán de Serdán, Puebla en 2022-2023.

3.4. CONCLUSIONES

El presente estudio proporcionó importantes resultados sobre las etapas fenológicas del desarrollo del fruto del café en Huitzilán de Serdán y hace una comparativa con regiones de Jamaica, Colombia, Brasil, y Coatepec, Veracruz.

Existen diferencias en el desarrollo del fruto dentro de México lo que podría significar que distintas ventanas comerciales.

El desarrollo fenológico en Jamaica es similar al de México, independientemente de las zonas dentro del país.

La duración de las fases fenológicas es la misma, de manera general, entre los hemisferios, sin embargo, se presentan en fechas distintas.

Los resultados encontrados proporcionan una referencia para futuras investigaciones fenológicas en México.

3.5. LITERATURA CITADA

- Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., & Wicke, H. (2001). Aplicación de la «escala BBCH ampliada» para la descripción de las fases fenológicas del desarrollo de la planta de café (*Coffea* sp.) [Boletín Técnico]. Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE: Aplicación de la escala BBCH ampliada para la descripción de las fases fenológicas del desarrollo de la planta de café *Coffea* sp
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (2018). *El café mexicano*. Cámara De Diputados. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/31El%20caf%C3%A9%20en%20M%C3%A9xico.pdf>
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2016). Respuestas al estrés por calor en los cultivos: Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Chmielewski, F. M. (2013). P Phenology in Agriculture and Horticulture. En M.D. Schwartz (ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science*, 539-561. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_29
- Enz, M., & Dachler, Ch. (1997). *Compendium of growth stage identification keys for mono- and dicotyledonous plants: Extended BBCH scale* (2ª ed.). German Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry (BBA): German Federal Office of Plant Varieties (BSA): German Agrochemical Association (IVA): Institute for Vegetables and Ornamentals in Grossbeeren/Erfurt. <https://www.hortiadvice.dk/upl/website/bbch-skala/scaleBBCH.pdf>
- Figuerola-Hernández, E., Pérez-Soto, F., & Godínez-Montoya, L. (2015). *La producción y el consumo del café*. Ecorfan-Spain. https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf
- Fischer, G., Parra-Coronado, A., & Balaguera-López, H. E. (2020). Aspectos del cultivo y la fisiología de la feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret). Una revisión. *Ciencia y Agricultura*, 17(3), 11-24. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11386>
- Flores-Vichi, F. (2015). La producción de café en México: Ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 4(7), 174-194. <https://doi.org/10.31644/IMASD.7.2015.a07>
- García-López, J. C. (2020). Cambios en sistemas productivos y elementos biofísicos, en fincas cafeteras de la zona central colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 21-38. <https://doi.org/10.38141/10778/71202>
- Kath, J., Byraredy, V. M., Reardon-Smith, K., & Mushtaq, S. (2023). Early flowering changes robusta coffee yield responses to climate stress and management. *Science of The Total Environment*, 856 (1). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158836>

- Leite-Torres, G., Nascimento-Campos, C., Vinicius-Salomon, M., Praela-Pantano, A., & Silva De- Almeida, J. A. (2021). *Coffea arabica* L: History, phenology and climatic aptitude of the state of São Paulo, Brazil. *Arquivos Do Instituto Biológico*, 88, Article e00602020.
- Morales-Ramos, V., Escamilla-Prado, E., Muñoz-Rodríguez, M., Velázquez Morales, J. A., & Spinoso-Castillo, J. L. (2021). *Perfiles de calidad del café de México*. Biblioteca Básica de Agricultura (BBA).
- Paes, Â. D. C., & Paes, M. B. D. C. (2001). Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, 60(1), 65-68. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., & Cerdán-Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: Caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Ingeniería y Región*, 24, 61-71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Ramírez-Builes, V. H. (2014). *La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones* [Folleto técnico]. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0441.pdf>
- Sadeghian, S. (2013). *Nutrición de cafetales*. En *Federación Nacional de Cafetaleros de Colombia, Manual del cafetalero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (3.^a ed., Vol. 2). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_7
- Unigarro, C. A., Imbachi, L. C., Darghan, A. E., & Flórez-Ramos, C. P. (2023). Quantification and Qualification of Floral Patterns of *Coffea arabica* L. in Colombia. *Plants*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183332>
- Whittaker, L., González-Moreno, P., Lowry, A., Vélez, L. J., Aristizábal, V., Aristizábal, L. F. P., Edgington, S., & Murphy, S. T. (2024). The effect of an altitudinal gradient on the abundance and phenology of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) (ferreri) (Coleoptera: Scolytidae) in the Colombia Andes. *International Journal of Pest Management*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/09670874.2024.2325346>

IV. CURVA DE EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL DE (*Coffea arabica* L.) 'Geisha Enana'

RESUMEN

En este estudio se buscaron las fechas de mayor demanda nutrimental para 'Geisha Enana' mediante la dinámica de extracción y acumulación nutrimental; en el proceso se recolectaron muestras de hojas y frutos, al mismo tiempo que se aplicaron fertilizantes foliares y granulares en la etapa de desarrollo del fruto. Los resultados mostraron que la acumulación de materia seca en los frutos fluctuaba debido a las distintas etapas fenológicas, con picos de acumulación en la fase de rápido crecimiento del fruto, encontrándose el pico máximo el 19/11/2022 durante la fase fenológica 81. La extracción de nutrientes variaba entre las hojas y los frutos, con una distribución inversa durante las primeras semanas después de la floración y cambios durante la etapa de maduración del fruto y la semilla. Durante las primeras 8 semanas, después de la floración, el fruto acumuló el 12.6 % de los macronutrientes. Al llegar a la semana 22, correspondientes a la etapa fenológica Desarrollo del fruto (7), encontramos que se extrajo por parte del fruto el 48 % del nitrógeno, 37 del K y 31.12 de Ca y, por parte de la hoja, el 54 % del N, 47 de K y 44 de Ca. Finalmente se observó que la fertilización foliar contribuyó a aumentar la concentración de materia seca y coincidió con los picos de acumulación de nutrimentos.

Palabras clave: fenología, fructificación, macronutrientes, fertilización.

ABSTRACT

NUTRIENT EXTRACTION CURVE OF *Coffea arabica* L.) ‘Geisha Enana’

This study aimed to determine the periods of highest nutrient demand for ‘Geisha Enana’ through the dynamics of nutrient extraction and accumulation. Leaf and fruit samples were collected while foliar and granular fertilizers were applied during the fruit development stage. The results showed that the accumulation of dry matter in the fruits fluctuated due to the different phenological stages, with peaks during the rapid growth phase of the fruit, with the highest peak observed on 11/19/2022 during phenological stage 81. Nutrient extraction varied between leaves and fruits, with an inverse distribution during the first weeks after flowering and changes during the fruit and seed maturation stage. During the first 8 weeks after flowering, the fruit accumulated 12.6 % of the macronutrients. By week 22, corresponding to the fruit development (7) phenological stage, it was found that the fruit extracted 48 % of nitrogen, 37 % of potassium and 31.12 % of calcium, while the leaves extracted 54 % of nitrogen, 47 % of potassium and 44 % of calcium. Finally, it was observed that foliar fertilization contributed to increasing the concentration of dry matter and coincided with the peaks of nutrient accumulation.

Keywords: phenology, fruiting, macronutrients. fertilization

4.1. INTRODUCCIÓN

La agricultura sostenible y la optimización de los sistemas productivos son temas de creciente importancia en el panorama agrícola mundial (Rodrigo-Comino et al., 2022). A pesar de que las evaluaciones económicas y técnicas de los sistemas agrícolas de café se han desarrollado en distintos países, hasta hace poco tiempo, en los sistemas cafetaleros, a pesar de su importancia económica, se evaluó la acumulación de la materia seca, su distribución y su análisis del crecimiento (Riaño-Herrera et al., 2004); temas importantes que ayudan a optimizar el uso de fertilizantes y, por consiguiente, a evitar la degradación del suelo donde se cultiva el café (Morales et al., 2019; Rodas-Rodríguez, 2022).

En este sentido, se han realizado estudios del efecto de la fertilización orgánica, química, foliar y granular en distintas dosis, fechas de aplicación y, en algunos casos, se consideran las etapas fenológicas del café (Noriega et al., 2014; García-López, 2020; Morales et al., 2019; Sadeghian, 2021; Sadeghian et al., 2012). Sin embargo, el estudio de la dinámica de la absorción y acumulación de nutrimentos de manera detallada y en todo el ciclo cafetalero ha sido poco estudiada, a pesar de que, junto con los resultados sobre la respuesta a la fertilización, se puede realizar un plan de manejo de fertilización más eficiente (Khalajabadi et al., 2012). Así mismo, debe considerarse que la concentración de los nutrientes en cada una de las etapas es distinta entre ellas, siendo ésta la razón por la que es importante identificar la fase de formación del fruto con mayor tasa de acumulación de nutrientes, además de considerar que si se aplican fertilizantes foliares tienen un efecto más rápido que la fertilización granular; no obstante, el uso de fertilizantes foliares se limita a cuando el objetivo es corregir o prevenir temporalmente deficiencias nutrimentales, ocurriendo esto cuando la absorción nutrimental en las raíces es limitado a causa de condiciones climáticas u otros factores (Arcila et al., 2007; Laviola et al., 2009)

Así, el objetivo del presente estudio fue determinar las fechas de mayor demanda nutrimental al relacionar las etapas fenológicas mediante la dinámica de extracción nutrimental y acumulación de nutrimentos en los diferentes órganos de la planta para generar un esquema de fertilización que permita optimizar el fertilizante.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. MUESTREO EN CAMPO

Se tomaron las muestras de hojas y frutos después de seleccionar cuatro ramas productivas distribuidas equitativamente en la parte media de la planta (Figura 2); de los cuatro puntos cardinales de ésta se tomó el tercer o cuarto nudo a partir del ápice de cada una de las bandolas antes seleccionadas (Sadeghian, 2013).



Figura 2. Parte productiva de la planta.

Las tomas de muestras se realizaron durante la mañana, antes del mediodía. Las muestras se almacenaron en bolsas de papel Kraft del número 8. Se colectaron hojas sanas, adultas y fotosintéticamente activas; en caso de retraso en el transporte, éstas fueron secadas al aire libre durante 12 horas. Las muestras fueron tomadas desde el 12 de abril del 2022 hasta el 15 de abril del 2023 tomando en cuenta tres bloques y tratamientos aplicados. Del 12 de abril al 26 de noviembre del 2022 se colectó una muestra compuesta de las unidades experimentales de un bloque, rotándose semanalmente entre los tres que conformaban el experimento. De esta forma, cada semana se tenían 80 frutos y 80 hojas (Cuadro 5), la colecta de frutos inició el 7 de mayo del 2022. Posteriormente, del 3 de diciembre del 2022 al 15 de abril del 2023, se tomaron muestras donde se consideraron los bloques y tratamientos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Número de muestras por colecta.

Órgano	Muestra total
Hojas *	80
Frutos*	80
Hojas #	180
Frutos #	240

*Muestreo hasta el 26 de noviembre del 2022. #Muestreo hasta el 15 de abril del 2023.

Las muestras, fueron pesadas para obtener el peso fresco y seco y, con los datos de peso seco se obtuvo una curva de peso seco del fruto.

4.2.2. FERTILIZACIÓN

Se fertilizaron de manera foliar y granular (Cuadro 6) 15 plantas ubicadas en tres bloques. Cada bloque estuvo conformado por cinco plantas sanas, productivas y de la misma edad (segundo año productivo). A partir del 27 de julio se aplicó, de manera granular, el fertilizante. El 7 de agosto se realizó una aplicación foliar, con una mochila aspersora “jacto XP” de 20 L y, el 22 de octubre se aplicó una fertilización granular y foliar. Todas las aplicaciones correspondieron a la etapa fenológica ‘desarrollo del fruto’.

Cuadro 6. Tratamientos de fertilización en café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Fuentes de fertilización	Concentración del fertilizante	Dosis total (g o ml/l)	Aplicación	
				1 ^a (g o ml/l)	2 ^a (g o ml/l)
Fertilización orgánica (T1)	Cascarilla de café		14,000	7	7
	Fruti-K	10-05-30-2.4 S-01 B-05 Zn	22	11	11
	Stopit	00-00-00-12 Ca	6	3	3
Fertilización (T2)	DAP	18-46-00	31	15.5	15.5
	Calcinit	15.5-00-00-26 Ca	144	72	72
Fertilización (T3)	DAP	18-46-00	50	25	25
	Calcinit	15.5-00-00-26 Ca	149	74.5	74.5
	Fruti-K	10-05-30-2.4 S-01 B-05 Zn	22	11	11
	Stopit	00-00-00-12 Ca	6	3	3
Fertilización orgánica y química (T4)	DAP	18-46-00	50	25	25
	Calcinit	15.5-00-00-26 Ca	149	74.5	74.5
	Efisoil	03-00-52	4.5	2.25	2.25
	Blackpot				
Testigo regional (T5)		19-04-19-3 Mg-			
	Hydran	02 S-0.12 B-0.1 Zn	80	40	40

El 27 de julio se aportaron 7 kg de composta de cascarilla de café; además, se utilizó la mitad del fertilizante DAP y la mitad de Calcinit según el tratamiento asignado. La mezcla de fertilizantes se colocó alrededor de la planta a 20 cm del tallo mediante la técnica de medialuna, asegurándose que estuviera en contra de la pendiente.

4.2.3. DETERMINACIÓN DE NUTRIENTES

Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Nutrición de Frutales de la Universidad Autónoma Chapingo para su secado en una estufa GCA/ Precision Scientific a 70° C durante 72 h siguiendo la metodología de Quesada-Roldan y Bertsch-Hernández (2013). Ya secas, se pesaron las hojas y frutos en una báscula compacta Ohaus Ranger 3,000 para obtener el peso seco. Todas las muestras fueron molidas y almacenadas en frascos multiusos de 50 ml color ámbar, o bien en sobres amarillos Oxford del No. 5, hasta su procesamiento.

Se inició con la determinación de N, seguido por Ca y K. Para ello se pesaron 0.5 g de cada órgano en una balanza analítica Ohaus PX224, y se colocó en un matraz micro Kjeldahl de 100 ml, marcado con la fecha de muestreo, bloque, tratamiento y órgano. Este proceso se repitió en dos ocasiones: la primera para N y la segunda para Ca y K. Durante el filtrado del extracto de K y Ca se utilizaron filtros Whatman de 90 mm $\varnothing$, matraces aforados de 50 ml y embudos de plástico, previamente humedecidos con agua destilada (Figura 3).



Figura 3. Filtrado de los extractos de potasio (K) y calcio (Ca) de café ‘Geisha Enana’.

Para la determinación de los elementos todos los equipos fueron calibrados. Se generaron curvas de calibración según las metodologías.

4.2.4. NITRÓGENO (N)

Las muestras fueron pesadas y colocadas en matraces micro Kjeldahl. Posteriormente se les adicionaron 4 ml de ácido sulfúrico (97.90 %) y ácido perclórico (69-72 %) con una relación 2:1 durante 16 h siguiendo la metodología propuesta de Martínez y Segovia (2013), lo que permitió la generación de amonio (NH_4^+). Subsecuentemente, los matraces fueron cubiertos con Parafilm (Figura 4).



Figura 4. Extracto para nitrógeno de café ‘Geisha Enana’.

A continuación se agregó peróxido de hidrógeno (2 ml) y los matraces fueron colocados en una estufa de digestión Lindberg/Bluem a 240° C/24 h (Sáez-Plaza et al., 2019). Concluido el proceso, las muestras se retiraron de la estufa dejándolas a temperatura ambiente, aproximadamente por 5 h.

Posteriormente se preparó ácido bórico (H_3BO_3) al 4 %, hidróxido de sodio (NaOH) al 40 % y un indicador rojo/verde de bromocresol. Para tal efecto, se pesaron 40 g de ácido bórico en una báscula compacta Ohaus Ranger 3,000 y se diluyeron en 1 L de agua usando un frasco volumétrico Pyrex de 1,000 ml. El hidróxido de sodio se pesó en una báscula y se diluyó en un 1 L, utilizando un frasco volumétrico de 1,000 ml. Los reactivos fueron colocados en frascos color ámbar con una etiqueta que indica la fecha de preparación y su concentración. El hidróxido de sodio fue utilizado para

generar amoníaco (NH_3) que, al mezclarse con el extracto de la digestión de nitrógeno, es absorbido por el ácido bórico (Sáez-Plaza et al., 2019).

Después de tener los reactivos preparados, se utilizaron matraces volumétricos de 125 ml Kimax, donde cada uno correspondió a una muestra. En ellos se vertieron cinco gotas del indicador rojo-verde con un gotero y 15 ml de ácido bórico. La solución generada tomó una coloración rosada (Figura 5). También se preparó el destilador Kjeldahl con agua hirviendo y 20 ml de hidróxido de sodio cada que se destilaba una muestra.



Figura 5. Reactivos para determinar nitrógeno en café ‘Geisha Enana’.

Una vez listos el destilador y los matraces, se procedió a destilar cada una de las muestras de los extractos. Esto consistió en aforar el matraz volumétrico a 50 ml. La determinación de N se realizó al titular con ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0.05 N (Figura 6) dado que al mezclar el amoníaco y el ácido bórico se generó amonio (NH_4^+) y un borato que, al reaccionar con el ácido sulfúrico genera un vire a la región ácida (pH entre 5 y 6) reflejándose en un cambio de color: de azul a rosa (Sáez-Plaza et al., 2019).



Figura 6. Titulación de los extractos de nitrógeno (N) para café ‘Geisha enana’.

Una vez recopilado todos los datos de las destilaciones, se procedió a calcular el (%) de nitrógeno mediante la fórmula propuesta por Alcántar-González:

$$N (\%) = ml \text{ de } H_2SO_4 \times N \text{ del } H_2SO_4 \times 14$$

La normalidad del ácido sulfúrico resultante fue de 0.005 N.

4.2.4. POTASIO (K)

Previo a la determinación de K, fue necesaria la preparación de una solución madre y, para ello, se pesaron 0.19 g de cloruro de potasio (KCl) en una balanza analítica Ohaus PX224. Posteriormente, se diluyó en 1 L de agua destilada utilizando un frasco volumétrico de 1,000 ml.

Una vez lista la solución madre y calibrado el equipo con una curva de calibración que contiene 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 ml de la solución madre, las muestras fueron leídas en un fotómetro de llama PFP 7. Las lecturas fueron registradas y posteriormente transformadas con la formula resultante de la curva de calibración presentando una r^2 de 0.9988.

$$Lectura \text{ de transmitancia} = 0.9993x + 1.6528$$

(x hace referencia al valor obtenido en la lectura)

Posteriormente se utilizó la fórmula propuesta por Alcantar-González y Sandoval-

$$\text{Villa: } K (\%) = \frac{\text{Lectura de transmitancia} \times \text{Vol}_{\text{digestión}} \times \text{Vol}_{\text{dilución}} \times 100}{\text{Pendiente} \times \text{Peso de la muestra} \times \text{Alicuota}}$$

Las lecturas se realizaron con 5 ml del extracto que estaban en vasos recolectores Dibar con una etiqueta que indicaba la fecha y órgano a evaluar. (Figura 7).



Figura 7. Extracto para determinar potasio (K) de café ‘Geisha Enana’.

4.2.5. CALCIO (Ca)

Para determinar Ca se preparó una solución del elemento a 1,000 ppm. Para ello se pesaron 2.4972 g de carbonato de calcio (CaCO_3) en una balanza analítica Ohaus PX224 y se diluyeron en 200 ml de agua destilada que contenía 5 ml de ácido clorhídrico (HCl). Las lecturas se realizaron en un fotómetro de llama PFP 7.

Con esta solución se realizó una curva de calibración y el resultado fue la siguiente formula con una r^2 de 0.9997:

$$Ca (\%) = 1.0104x - 0.0324$$

(x hace referencia al valor obtenido en la lectura)

Posteriormente se utilizó la fórmula propuesta por Alcantar-González y Sandoval-Villa:

$$Ca (\%) = \frac{\text{Lectura de transmitancia} \times \text{Vol}_{\text{digestión}} \times \text{Vol}_{\text{dilución}} \times 100}{\text{Pendiente} \times \text{Peso de la muestra} \times \text{Alicuota}}$$

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo del fruto se caracteriza por presentar un desarrollo doble sigmoide (Laviola et al., 2009), con un crecimiento inicial lento debido a que durante esta etapa el fruto presenta principalmente división celular del pericarpio y la semilla (DaMatta et al., 2007; Melese & Kolech, 2021). Según Ramos (2010) y Sanz-Urbe et al. (2018), en café, este primer crecimiento se presenta de la semana 0 a la semana 8. Posteriormente sigue un crecimiento rápido, presentándose, de la semana 9 hasta la 26 y, finalmente, un segundo crecimiento lento (de la semana 27 a la 32), correspondiente a la maduración fisiológica del fruto (Giraldo et al., 2010). Esto corresponde a lo encontrado en nuestro estudio, sin embargo, se presentaron algunas variaciones.

Estas variaciones pueden deberse a lo descrito por DaMatta et al. (2007), donde se ha que durante las semanas 17 y 18 existe una acumulación de materia seca, es decir, se presenta un pico de crecimiento debido a la deposición de esta materia en los granos (endospermo). Además, describe que de la semana 24 a la 34 ocurre en el pericarpio un incremento de tamaño y masa fresca y seca, al pasar el fruto de color amarillo a rojo. Esto se ajusta con lo ocurrido en nuestro estudio.

También pueden deberse al hecho de que la morfología y anatomía de la hoja del café facilitaron la fertilización foliar (Rodríguez et al., 2016) pues, aunque el parénquima en empalizada disminuye su tamaño cuando existe sombra, lo mismo que el tamaño de la hoja, no se ve afectada la tasa fotosintética en comparación con una hoja de café a pleno sol; además, la cantidad y el tamaño de estomas tampoco se ve afectada (Santos, 1999), por lo que la fertilización foliar es aprovechada de la misma manera, al permitir un incremento en la cantidad de fotoasimilados y favorecer la acumulación de materia seca en la hoja (Arcila-Pulgarín et al., 2007), sobre todo de Ca, debido a su poca movilidad; sin embargo, el N y K se trasladan a los lugares de mayor demanda nutrimental de la planta (Fernández et al., 2015). Lo que nos indicaron los resultados es que las fertilizaciones foliares aplicadas en este estudio tuvieron un efecto positivo, ya que los minerales presentes se vieron reflejados en la hoja y posteriormente en el fruto.

4.3.1. MATERIA SECA DE LOS FRUTOS

La extracción de nutrientes se determinó a partir del peso promedio de 80 frutos (144 g) y de 240 frutos (432 g), Los cuales se utilizaron para generar la curva de acumulación de materia seca (figura 8).

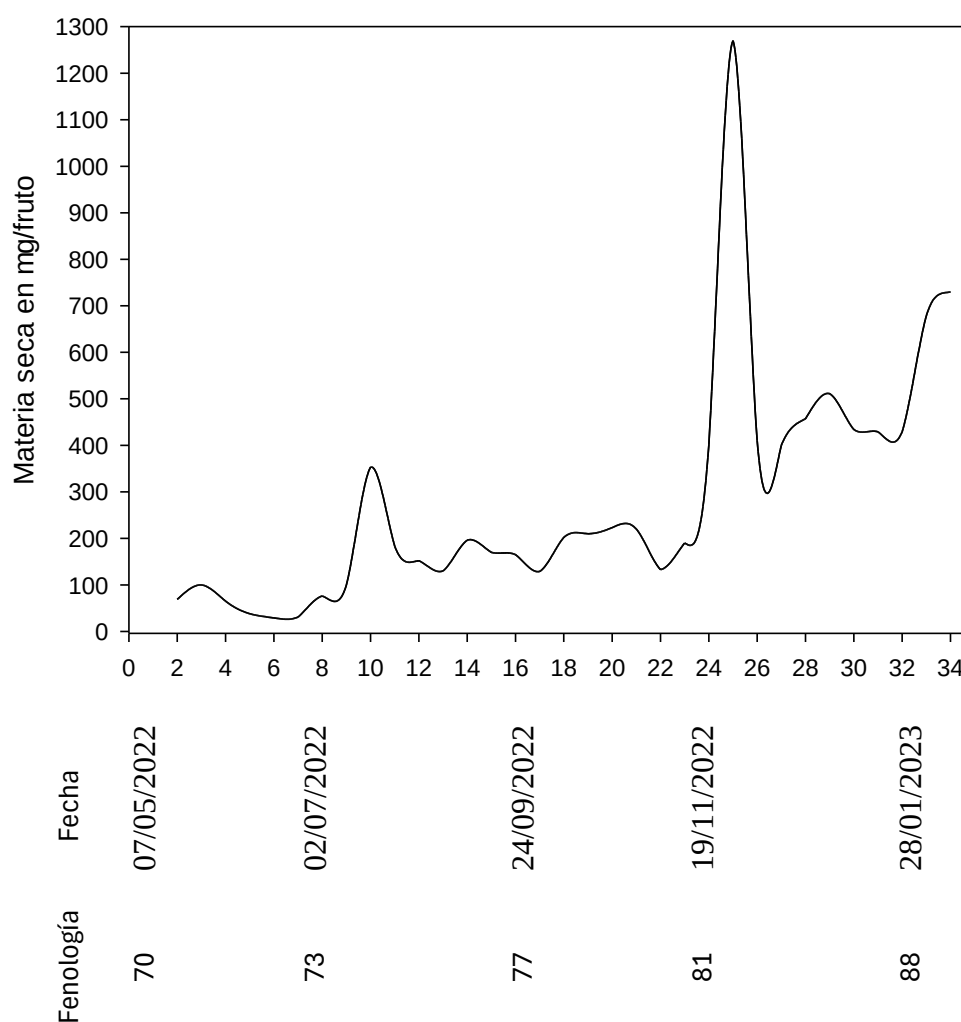


Figura 8. Acumulación de materia seca del fruto (mg/fruto) para ‘Geisha Enana’ siguiendo las fases fenológicas .

Las fluctuaciones en la acumulación de materia seca se explican por la superposición de floraciones y fases fenológicas, lo que genera una competencia por los nutrientes entre los órganos fuente y los órganos demanda, como sugiere Unigarro et al. (2023). Además, estas fluctuaciones pueden ser atribuidas al proceso de floración y desarrollo del fruto, que dependen de factores climáticos como la temperatura y la disponibilidad de agua (Ramírez et al., 2010).

En nuestra investigación, la primera medición corresponde al 7 de mayo del 2022, que concurre con la fase fenológica 70 según la escala BBCH. La primera etapa (lento crecimiento) concluye en la semana 8 (2/07/2022), que encaja con la fase 73 según la escala BBCH. Durante este periodo los frutos ejercen una mayor fuerza para translocar y metabolizar los fotoasimilados y nutrientes desde las hojas (Laviola et al., 2009).

Este estudio no coincidió con Laviola et al. (2009). Ellos reportaron una acumulación de materia seca para el fruto entre 0 y 100 mg/fruto. Sin embargo, en el presente estudio se reporta una medición por arriba de 100 mg/fruto (352 mg/fruto), lo que podría indicarnos que al momento de la colecta de la muestra se cortaron algunos frutos que no correspondían a la fase fenológica, ya que el fruto presenta un crecimiento debido a la división celular y no expansión celular lo que no debería generar una mayor acumulación de materia seca (Melese & Kolech, 2021). Sin embargo, nuestros resultados coincidieron con lo dicho por Sadeguian et al. (2012).

De la semana 9 a la 26 (06/08/2022 al 03/12/2022) encontramos acumulación de materia seca de hasta 1,270 mg/fruto siendo el pico de acumulación más alto, sin embargo, los datos oscilan entre 128 y 456 mg/fruto. Laviola et al., (2009) reporta una acumulación constante de materia seca menor a 300 mg/fruto, distinto a lo que se reporta en esta investigación. Arcila-Pulgarin y Jaramillo-Robledo (2003) reportan una acumulación de materia seca que oscila entre 0.2 y 0.4 g de materia seca que corresponde con nuestro estudio. Este incremento en acumulación de materia seca se debe a que durante este periodo se presentó, principalmente, el desarrollo del endospermo (semilla solida) (DaMatta et al., 2007). Las diferencias entre los trabajos pueden deberse a las condiciones climáticas distintas, sobre todo las hídricas (Arcila-Pulgarín & Jaramillo-Robledo, 2003) que, aunque esa información, es un factor importante que determina el tamaño del grano (Laviola et al., 2009).

4.3.2. EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL EN HOJA Y FRUTO

Los iones son impulsados de la raíz a la hoja y, de la hoja al fruto por el gradiente de potencial de agua creado por la corriente transpiratoria y por el gradiente de presión hidrostática (Arcila-Pulgarín et al., 2007), además, la tasa de transpiración, afectada por la temperatura y precipitación, aumenta la toma y traslocación de minerales en el fruto y la hoja (Anand et al., 2014; Chaves-Barrantes & Gutiérrez-Soto, 2016), sin embargo, la concentración de los elementos minerales en el fruto dependen más del componente genético que de la interacción genotipo ambiente (Riaño-Herrera et al., 2004). Por tal motivo, encontramos que durante la primera etapa (crecimiento lento) que abarca hasta la semana 8 (02/07/2022), la extracción de N, K y Ca en el fruto es baja y en la hoja alta.

Además, debido al climaterio del café (Ságio et al., 2014), al comenzar el desarrollo del fruto (fase fenológica 70; 07/05/2022 al 14/05/2022), se presentan altas tasas respiratorias de este y, como consecuencia, la generación de fotoasimilados sin que estos puedan acumularse en este órgano dado que son convertidos en energía para la formación de nuevas células (Laviola et al., 2009) (Figura 10).

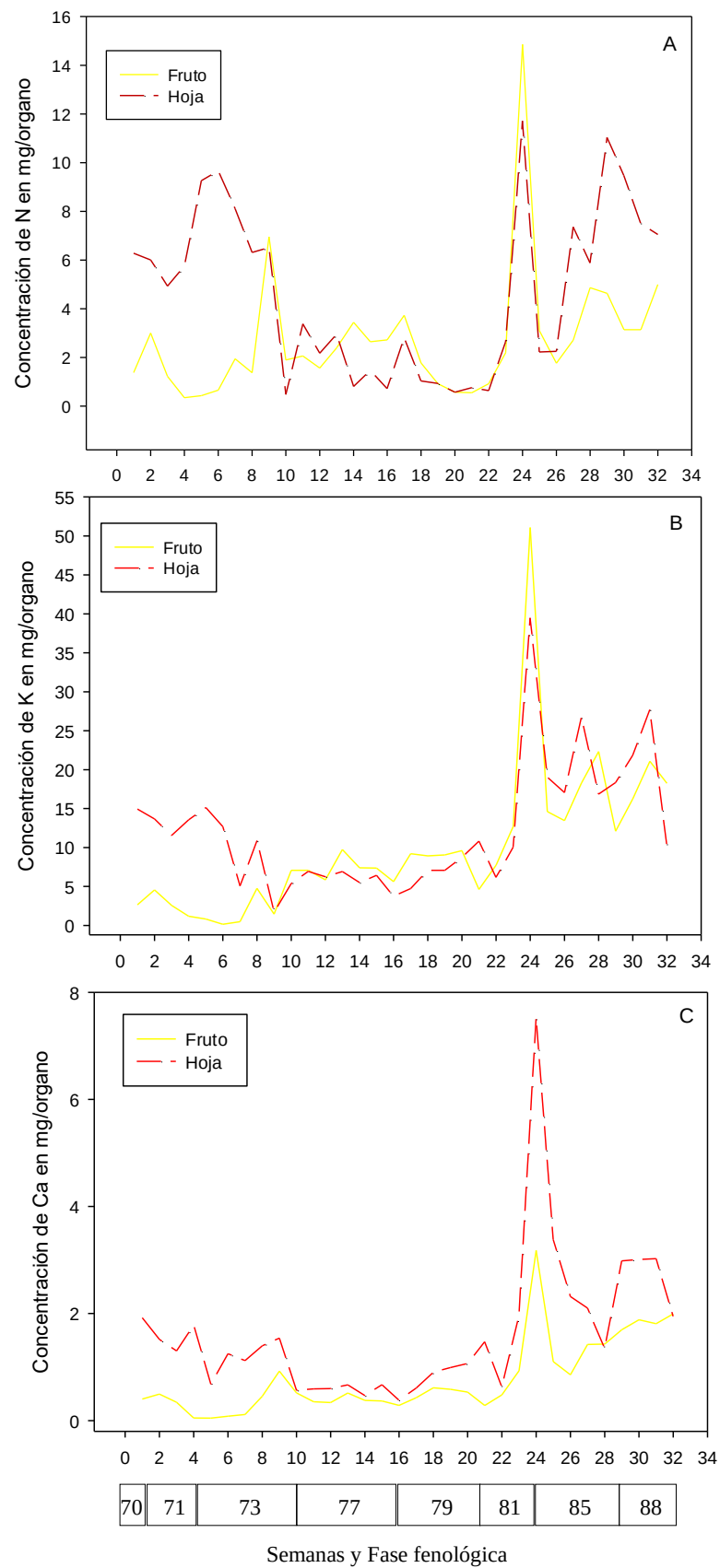


Figura 9. Extracción de nitrógeno (A), potasio (B) y calcio (C) para ‘Geisha Enana’

Durante las primeras 8 semanas (07/05/2022 al 02/07/2022), después de la floración, encontramos que el fruto acumuló el 12.6 % de los macronutrientes que concuerda con Sadeguián et al. (2012). Por otro lado, al considerar las primeras 22 semanas (07/05/2022 al 05/11/2022) correspondientes a la etapa fenológica desarrollo del fruto (7), encontramos que se extrajo por parte del fruto el 48 % del nitrógeno, 37 del K y 31.12 de Ca y, por parte de la hoja, el 54 % del N, 47 de K y 44 de Ca mostrándose, en ambos órganos, una distribución inversa entre ellos debido a que los nutrientes de las hojas se movilizan hacia los frutos (Khalajabadi et al., 2012).

También se observó que al acercarnos a la semana 22 (05/11/2022) se generó un incremento en la extracción de los macroelementos presentes en el fruto y una disminución en la hoja. Esto puede deberse a que comienza el desarrollo del endospermo, lo que provoca un incremento en la concentración de la materia seca y, por tanto, de los macroelementos presentes en el fruto (DaMatta et al., 2007). Además, durante esta fase fenológica, entre la semana 15, puede presentarse el mayor incremento, en cm, de las ramas y tallos, provocando que los fotoasimilados se redistribuyan hacia estos órganos en crecimiento en lugar de mantenerse en las hojas (Azcón-Bieto & Talón, 2008; Unigarro et al., 2023), por tal motivo encontramos un decremento en la concentración de los macroelementos. Este fenómeno también es el causante de que la demanda de nitrógeno, potasio y calcio no cambie a pesar de que exista un cambio en la producción del fruto durante los años (Khalajabadi et al., 2012).

La mayor presencia de los macroelementos en las hojas durante las semanas 5 y 11 (11/06/2022 al 20/08/2022) puede deberse a que se presentó, de manera natural, una caída de los frutos, que genera una mayor concentración del elemento en las hojas (Unigarro et al., 2023).

Entre la semana 23 y 32 (12/11/2022 al 28/01/2023), durante la maduración del fruto y la semilla, se presentó una concentración del 52 % de N, 37 de K y 69 del Ca. En esta fase fenológica se encontró la mayor concentración de N (14.85 mg/fruto). Por otro lado, para K, el pico de extracción nutrimental fue en la semana 23, y coincidió con la fase 8 subfase 1, lo mismo que el Ca con una extracción de 3 mg/fruto.

A diferencia de Sadeguain et al. (2012) la concentración de estos elementos no disminuyó, sin embargo, sí existen coincidencias en que el K es el elemento con mayor presencia; por las 32 semanas 350.80 mg/fruto, seguido de N y Ca (92.61 mg/fruto y 27.57 mg/fruto, respectivamente. Esto debido a que el fruto es un consumidor neto de fotoasimilados (Azcón-Bieto & Talón, 2008).

4.4. CONCLUSIÓN

La acumulación de macronutrientes corresponde a la acumulación de materia seca. Además, el potasio se caracterizó por ser el más abundante tanto en hoja como en fruto, seguido del nitrógeno y calcio.

La mayor acumulación de macronutrientes (60 %) se presentó entre la semana 22 (05/11/2022) y 31 (21/01/2023), durante la maduración del fruto y la semilla.

La concentración foliar de nitrógeno, potasio y calcio disminuyó o aumentó inversamente a la concentración del fruto; lo que indica una removilización de los macroelementos. Esta condición cambió a partir de la semana 23 (12/11/2022), durante la maduración del fruto y la semilla. Durante este periodo la concentración de nitrógeno y potasio fue similar en hoja y fruto excepto calcio.

La fertilización foliar ayudó a aumentar la concentración de materia seca. Las aplicaciones coincidieron con picos de acumulación.

En la semana 15 (17/09) se debe fertilizar para que se aprovechen los macronutrientes en la semana 23 (12/11), cuando inicia la maduración del fruto y la semilla. Además, se debe fertilizar de manera foliar, en la semana 9 (06/08) y 20 (22/10) para favorecer la acumulación de materia seca en el fruto y ayudar al desarrollo del endospermo.

4.5. LITERATURA CITADA

- Arcila-Pulgarín, J., Farfan, F. F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia: Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en los sistemas de producción de café*. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>
- Arcila-Pulgarín, J., & Jaramillo-Robledo, Á. (2003). *Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto* [Folleto técnico]. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4215>
- DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., & Barros, R. S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 485-510. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>
- Fernández, V., Sotiropoulos, T., & Brown, P. (2015). *Fertilización foliar: Principios científicos y práctica de campo* (1^a ed.). IFA. https://www.researchgate.net/publication/283908842_Fertilizacion_Foliar_Principios_Cientificos_y_Practicas_de_Campo
- García-López, J. C. (2020). Cambios en sistemas productivos y elementos biofísicos, en fincas cafeteras de la zona central colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 21-38. <https://doi.org/10.38141/10778/71202>
- Giraldo, P. J. R., Uribe, J. R. S., & Tascón, C. E. O. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Revista Cenicafé*, 61(4), 315-326. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/506/1/arc061%2804%29315-326.pdf>
- Laviola, B. G., Martinez, H. E. P., De Souza, R. B., Salomão, L. C. C., & Cruz, C. D. (2009). Macronutrient Accumulation in Coffee Fruits at Brazilian Zona Da Mata Conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 32(6), 980-995. <https://doi.org/10.1080/01904160902872164>
- Melese, Y. Y., & Kolech, S. A. (2021). Coffee (*Coffea arabica* L.): Methods, Objectives, and Future Strategies of Breeding in Ethiopia—Review. *Sustainability*, 13(19), 10814. <https://doi.org/10.3390/su131910814>
- Morales, P., Cordon, L., Girón, J., & Morales, S. (2019). *La fertilización al suelo y foliar: Un componente básico para mantener la productividad en las empresas cafetaleras* [Folleto]. <https://www.anacafe.org/uploads//file/bb1e602c37b148df897c61a5f1ba9682/Boletin-CEDICAFE-Mayo-2019-.pdf>
- Noriega, G., Cárcamo, B., Gómez, M. Á., Schwentesius, R., Cruz, S., Leyva, J., García, E., López, U., & Martínez, A. (2014). Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: Caso café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 163-169.

- Ramírez, V. H., Arcila, J., Jaramillo, A., Rendón, J. R., Cuesta, G., Menza, H. D., Mejía, C. G., Montoya, D. F., Mejía, J. W., Torres, J. C., Sánchez, P. M., Bauter, J. E., & Peña, A. J. (2010). Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica térmica y de brillo solar. *Cenicafé*, 61(2), 132-158. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/492/1/arc061%2802%29132-158.pdf>
- Riaño-Herrera, N. M., Arcila-Pulgarín, J., Jaramillo-Robledo, Á., & Chaves-Córdoba, B. (2004). Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetalera central. *Cenicafé*, 55(4), 265-276. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/263/1/arc055%2804%29265-276.pdf>
- Rodas-Rodríguez, R. C. (2022). *Curva de la ley de rendimiento decrecientes-CLRD-en el cultivo del café* [Folleto]. <https://www.anacafe.org/uploads/file/0d5857ddec4e4531a7ec4dc46e9ec7b9/Boletin-CEDICAFE-Mayo2022.pdf>
- Rodrigo-Comino, J., Caballero-Calvo, A., Salvati, L., & Senciales-González, J. M. (2022). Sostenibilidad de los cultivos subtropicales: Claves para el manejo del suelo, el uso agrícola y la Ordenación del Territorio. *Cuadernos Geográficos*, 61(1), 150-167. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.22284>
- Rodríguez, L. A. L., Guevara, F. H., Gómez, H. C., Fonseca, M. F., Gómez, J. C. C., & Pinto, R. R. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronómica*, 65(3), 248-254. <https://doi.org/doi:http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.46731>
- Sadeghian, S. (2013). *Nutrición de cafetales. En Federación Nacional de Cafetaleros de Colombia, Manual del cafetalero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (3.^a ed., Vol. 2). *Cenicafé*. https://doi.org/10.38141/10791/0014_7
- Sadeghian, S. (2021). *Nutrición de cafetales* [Folleto]. https://doi.org/10.38141/10791/0014_7
- Sadeghian, S., Mejía, B., & González, H. (2012). Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en los frutos de café (*Coffea arabica* L.). *Cenicafé*, 63(1), 7-18. <https://www.cenicafe.org/es/publications/1.Acumulacion.pdf>
- Sáez-Plaza, P., García, A., & Martín, J. (2019). *Una anotación sobre el método de Kjeldahl*. 85(1).
- Santos, A. T. (1999). *Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos* [Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/96406>
- Unigarro, C. A., Imbachi, L. C., Darghan, A. E., & Flórez-Ramos, C. P. (2023). Quantification and Qualification of Floral Patterns of *Coffea arabica* L. in Colombia. *Plants*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183332>

V. FERTILIZACIÓN EN LA CALIDAD DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) 'Geisha Enana'

RESUMEN

Debido a que la calidad del café es un atributo que se aprecia a nivel nacional e internacional, existe un esfuerzo constante por cuidar las variables que afectan esta calidad. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de fertilizante, convencional y orgánico en la mejora de la calidad física y organoléptica del grano del cultivar Geisha Enana en la comunidad de Huitzilán de Serdán, Puebla. Se determinó el rendimiento, mostrando mejores resultados la fertilización con DAP, Calcinit y fertilización foliar (Fruti-K más Stopit), aunque no mostró diferencias significativas con la fertilización orgánica. Se evaluaron las características físicas del grano. Los resultados mostraron que la fertilización orgánica propicia mayor número de defectos primarios en la zaranda 19, mientras que la fertilización con DAP y Calcinit presentó un alto porcentaje de defectos primarios y granos caracol. En cuanto la calidad organoléptica, el análisis de componentes principales mostró relación entre los tratamientos y sus efectos en la calidad del grano y la cata. Sin embargo, el manejo postcosecha influyó en la calidad física del grano, lo que sugiere la necesidad de mejorar estas prácticas.

Palabras clave: calidad física, calidad organoléptica, rendimiento agroindustrial, orgánico.

ABSTRACT

FERTILIZATION IN THE QUALITY OF COFFEE (*Coffea arabica* L.) ‘Geisha Enana’

Given that coffee quality is an attribute valued both nationally and internationally, there is a constant effort to manage the variables affecting this quality. The aim of this study was to evaluate the effect of applying conventional and organic fertilizers on improving the physical and organoleptic quality of the ‘Geisha Enana’ coffee bean in the community of Huitzilan de Serdán, Puebla. Yield was determined, showing better results with fertilization using DAP, Calcinit and foliar fertilization ((Fruti-K plus Stopit), although there were no significant differences compared to organic fertilization. The physical characteristics of the bean were evaluated. The results showed that organic fertilization led to a higher number of primary defects in sieve 19, while DAP and Calcinit fertilization presented a high percentage of primary defects and peaberry beans. Regarding organoleptic quality, principal component analysis showed a relationship between treatments and their effects on bean quality and cupping. However, post-harvest handling influenced the physical quality of the bean, suggesting the need to improve these practices.

Keywords: physical quality, organoleptic quality, agro-industrial yield, organic.

5.1. INTRODUCCIÓN

El café juega un papel importante en la economía de más de 80 países productores al ser una fuente de empleo e ingresos (Canet-Brenes & Soto-Viquez, 2017). En México, específicamente, las exportaciones han mostrado un crecimiento anual del 1.8 % (Rizzuto & Liliana, 2014), atribuible a la calidad distintiva de su café; permitiendo una exitosa incursión tanto en el mercado internacional como en los segmentos de especialidad (Monsalve-Vásquez, 2022).

La calidad, atributo que se aprecia a nivel nacional e internacional, es multifacética y determinada por la interacción de factores genéticos y ambientales que definen los atributos físicos, organolépticos y bioquímicos del grano y la bebida (Decazy et al., 2003). Entre los atributos bioquímicos se encuentran la concentración de cafeína y trigonelina, compuestos que contribuyen al amargor y sabor de la bebida (Febrianto & Zhu, 2023) y que son afectados negativamente por la altitud (Worku et al., 2018), pudiendo alcanzar concentraciones en la bebida de 7 a 36 mg⁻³ (Bicho et al., 2012); lípidos, sacarosa y ácido clorogénico, influenciados positivamente, por la altitud y precursores de aromas (Worku et al., 2018). Los atributos físicos de interés por parte de los académicos y comerciantes son: el tamaño, influenciado negativamente por la falta de agua y altas temperaturas; color, como indicador de procesos oxidativos que intervienen en el sabor y aroma (Borém et al., 2013); contenido de humedad, actividad del agua y apariencia general del grano, influenciados por los nutrimentos (Rosas-Arellano et al., 2008). Entre los atributos organolépticos se encuentran: olor, fragancia, aroma y sabor; influenciados estos dos últimos por la temperatura promedio (18 a 23 °C) (Bertrand et al., 2012); sabor residual y acidez, afectada positivamente por la altitud (<600 m y >1,900 m) (Ortega & Pino, 2017; Osorio et al., 2021), sombra y cuerpo (Pabón & Osorio, 2019).

Melo y Martínez (2015) revelaron que la aplicación foliar de nitrógeno (N) y boro (B), 80 g/l de Nutrilife y 38 g/l de Ascofol, influyeron en el tamaño y peso del fruto, así como en el número de frutos por bandola. Anand et al. (2014) mencionaron que la caída de frutos en las primeras 11 semanas puede deberse, principalmente a la mala o nula fertilización del cafetal, lo que lleva a una disminución del rendimiento.

La combinación adecuada de N (800 kg/ha), P (100 kg/ha) y K (de 100 a 250 kg/ha) es esencial para mejorar la bioquímica del grano (contenido de sacarosa, lípidos y cafeína) (Vinecky et al., 2017) siempre y cuando se aplique de forma adecuada, es decir, de manera seccionada, tres a cuatro aplicaciones, durante el año y a no más de 50 cm del tallo principal (Sadeghian, 2022). Las fuentes más comunes pueden ser urea, superfosfato de calcio triple, cloruro de potasio, sulfato de potasio, nitrato de amonio, sulfato de amonio, fosfato monoamónico y fosfato diamónico (Sadeghian, 2022). El K y N, de manera individual, contribuyen al incremento del contenido de lípidos y ácido clorogénico, al tiempo que influyen en los atributos organolépticos, disminuyendo con el aumento de la radiación (100 %,.) y reducción de N (de 150 a 0 kg/ha) (Bote & Vos, 2017; Vinecky et al., 2017). Este decremento impacta positivamente en la fragancia, aroma, y diversos sabores en taza, incluyendo matices como chocolates, caramelos y frutales, así como en la acidez y cuerpo de café (Rosas-Arellano et al., 2008b; Suárez-Salazar et al., 2015).

No obstante, la carencia o aplicación inadecuada de fertilizantes puede resultar en la reducción del tamaño del grano, caída o disminución de su masa seca (de 14.1 a 11.8 g; medida en 100 g) (Anand et al., 2014; Khemira et al., 2023; Silva & Lima, 2012). El K tiene una relación directa con la fragancia y aroma del café (Vinecky et al., 2017), siendo un factor determinante para una calidad superior, siempre y cuando su concentración no exceda el 1.75 % ya que esto podría afectar negativamente la calidad del grano de café (Atlahua, 2019; Suárez-Salazar et al., 2015).

El Ca mantiene una relación positiva con la acidez en taza, fragancia y aroma (Burgos et al., 2014a; Rosas-Arellano et al., 2008). Por su parte, el Mg se suma a la complejidad de la fertilización al influir específicamente en el aroma del café (Puerta-Quintero, 2013). Jaramillo-Botero (2010) sugirió que la fertilización no tiene un impacto significativo en el rendimiento de café, pues no influyó en la cantidad de nudos productivos ni en el número de hojas en comparación con factores como la sombra y el riego.

Por tanto, este estudio tuvo como objetivo investigar el efecto de la aplicación de fertilizante, convencional y orgánico en la mejora de la calidad física y organoléptica del grano de café ‘Geisha Enana’.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento, iniciado el 27 de febrero de 2022, al final de la cosecha, se desarrolló en un terreno donde se encontraba variedad Geisha Enana. Se seleccionaron 15 plantas, distribuidas en bloques de 5 plantas cada uno, tomando en cuenta las condiciones de suelo (Cuadro 7) y lomerío. Se definieron 8 filas de plantas entre bloques para establecer una barrera. Cada planta se trató como unidad experimental fertilizada con anterioridad con la fórmula 19-4-19-3 Mg-2 S-12 B-1 Zn durante los años previos al experimento y podas de saneamiento en los meses de junio, julio y agosto. Las plantas se encontraban en su segundo año de producción. Además, se realizaron tres análisis de suelo en la zona de estudio a una profundidad de 30 cm y se comparó con la clasificación realizada por CENICAFÉ (Cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis de suelo de Huitzilán de Serdán, Puebla (2022).

Muestra	pH 1:2	C.E. 1:2	C Orgánico	M. O.	N	P
		dS/m	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
M1	4.60	0.15	5.26	9.06	36.96	1.74
M2	4.56	0.19	5.6	9.66	46.03	3.50
M3	5.20	0.08	4.22	7.28	25.20	0.12
Promedio	4.80	0.10	5.00	8.70	36.10	1.80
Cenicafé	Bajo			medio	bajo	bajo
Continúa...						
K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Fe ⁺²⁺³	CIC		
mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	Cmol(+) kg ⁻¹		
145.16	93.56	46.00	19.00	19.34		
210.84	164.28	43.38	26.16	21.26		
227.68	270.04	82.54	12.08	19.68		
194.60	176.00	57.30	19.10	20.10		
alto		bajo	bajo			

5.2.2. FERTILIZACIÓN

La fertilización en café debe realizarse de manera fragmentada, idealmente uno o dos meses antes del periodo de mayor demanda de nutrientes, que se presenta en los 60 y 180 días después de la floración (Sadeghian, 2022). Por tanto, en México, se recomiendan los meses de abril, mayo, septiembre y octubre; ajustándose al desarrollo del fruto (Ramírez-Builes, 2014).

La fertilización se asignó aleatoriamente en las 15 plantas donde se consideró el diseño de bloques completamente al azar, con aplicaciones realizadas el 27 de julio (granular), el 7 de agosto (foliar, con una mochila aspersora “jacto XP” de 20 l), y el 22 de octubre (granular y foliar) en el año 2022. Todas las aplicaciones correspondieron a la etapa fenológica ‘desarrollo del fruto’.

Durante la primera aplicación de fertilizantes el 27 de julio, se aportaron 7 kg de composta, siguiendo las indicaciones de Sadeghian (2013). Además, se utilizó la mitad del fertilizante DAP y la mitad de Calcinit según el tratamiento asignado (Cuadro 8). La mezcla de fertilizantes se colocó alrededor del árbol a 20 cm del tallo mediante la técnica de medialuna asegurándose de que estuviera en contra de la pendiente.

Cuadro 8. Tratamientos de fertilización en café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Fuentes de fertilización	Concentración del fertilizante	Dosis total (g o ml/l)	Aplicación	
				1 ^a (g o ml/l)	2 ^a (g o ml/l)
Fertilización orgánica (T1)	Cascarilla de café		14,000	7	7
	+				
	Fruti-K	10-05-30-2.4 S-01	22	11	11
	+	B-05 Zn			
Fertilización (T2)	Stopit	00-00-00-12 Ca	6	3	3
	DAP	18-46-00	31	15.5	15.5
	+				
Fertilización (T3)	Calcinit	15.5-00-00-26 Ca	144	72	72
	+				
	DAP	18-46-00	50	25	25
	+				
	Calcinit	15.5-00-00-26 Ca	149	74.5	74.5
Fertilización orgánica y química (T4)	+				
	Fruti-K	10-05-30-2.4 S-01	22	11	11
	+	B-05 Zn			
	Stopit	00-00-00-12 Ca	6	3	3
Fertilización orgánica y química (T4)	DAP	18-46-00	50	25	25
	+				
	Calcinit	15.5-00-00-26 Ca	149	74.5	74.5
	+				
Fertilización orgánica y química (T4)	Efisoil	03-00-52	4.5	2.25	2.25
	Blackpot				
Testigo regional (T5)		19-04-19-3 Mg-			
	Hydran	02 S-0.12 B-0.1 Zn	80	40	40

Los análisis de suelo, la densidad de plantación y la propuesta de CENICAFÉ se utilizaron para elaborar la fórmula de fertilización (Cuadro 9).

Cuadro 9. Formula de fertilización ajustada al sitio experimental (Café Huitzi).

Elemento	CENICAFÉ (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Ajuste (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Datos adicionales	
			CENICAFÉ	Huitzilan
Nitrógeno (N)	300	120		
Fósforo (P)	40-60	20-40*	7,500	3,000
Potasio (K)	260-300	104	plantas/ha	plantas/ha
Magnesio (Mg)	0-40	16		

*Niveles de fósforo utilizados en los tratamientos.

5.2.3. COSECHA Y ANÁLISIS FÍSICO DEL GRANO

Las plantas se cosecharon individualmente al presentar un color rojo intenso (etapa fenológica 88; según la escala BBCH). Los frutos fueron almacenados en bolsas de papel Kraft marcadas con la fecha, bloque y tratamiento y, posteriormente, se contaron y pesaron los frutos en una balanza Ohaus modelo NVT 160 1-1, obteniendo así, el peso promedio por tratamiento y el rendimiento de cereza por tratamiento. En seguida se despulparon manualmente y se fermentaron durante 24 h para después ser lavados y expuestos al sol por 24 h para secarlos siguiendo el proceso de beneficio húmedo; diferenciándose esta vía por el despulpado, remoción del mucilago, lavado, secado para la obtención del café pergamino (Puerta-Quintero, 2000; Ramos & Criollo, 2017).

Una vez secos los frutos, se pesaron por tratamiento y bloque. Se calculó el rendimiento agroindustrial de cereza a pergamino y pergamino a verde (oro) utilizando la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de cereza (g)} * \text{factor de rendimiento (x)}}{\text{peso de café (x)}}$$

En esta ecuación, x hace referencia a 57.5 kg de café pergamino y a 45.5 kg de café oro equivalentes a un quintal (López-García et al., 2016).

En 100 frutos verdes, por triplicado, se determinó la correlación entre el peso y la actividad del agua mediante un análisis de correlación de Pearson siguiendo la metodología de López-García et al. (2016). Las lecturas de actividad de agua se realizaron con un medidor para alimentos WA-60 MeterTo. Posteriormente se evaluó el efecto de los tratamientos en el peso del grano de café pergamino mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$).

El café pergamino no utilizado se mezcló considerando los tratamientos aplicados y, de manera aleatoria, se formaron tres repeticiones de 350 g para su trillado y evaluación física. A partir de estas muestras se caracterizó el café según su tamaño y defectos (planchuela, triángulos, elefante, concha, quebrado y caracol) utilizando zarandas de 19/64", 18/64", 17/64", 16/64", 15/64". Para estas variables, tamaño y defectos, se realizaron análisis de varianza y comparación de medias.

Se aplicaron conceptos y metodologías respaldados por la norma mexicana NMX-F-586-SCFI-2008 y el manual de la Specialty Coffee Association 2018 (SCA) para evaluar la calidad física y organoléptica del grano de café. Se realizaron un análisis de componentes principales para las variables organolépticas y físicas.

5.2.4. ANÁLISIS SENSORIAL

La evaluación sensorial inició con la determinación de humedad, actividad del agua y peso en oro de 100 g de café por tratamiento. Posteriormente estos granos fueron pesados y tostados en una tostadora Probat-werke 2017, con una rampa de temperatura que inició con 180 °C reducida gradualmente a 175-170 °C durante 12 min. Para obtener el rendimiento en tostado (g) los granos fueron pesados nuevamente tomando en cuenta los tratamientos. Posteriormente se determinó el color con un colorímetro 3NH NR60CP, siguiendo la propuesta del manual de la SCA ("Roast Color Classification System") de 1995.

De los 100 g de café tostado se tomaron 12 g por cuadruplicado por tratamiento con una balanza Ohaus Scoul-5854. Los granos fueron molidos en un molino profesional Mahlkonig EK 43. Se utilizaron tazones de porcelana de 8 onzas para colocar el café molido etiquetándolos con códigos de Excel para una evaluación anónima. La mesa de catadores incluyó un catador Q-Grader, dos estudiantes con experiencia y uno sin experiencia. Se utilizó un formato de evaluación conforme a la metodología de Partida (2018) y el manual "Coffee Flavor MAP" (2016).

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. RENDIMIENTO AGROINDUSTRIAL Y CALIDAD FÍSICA DEL GRANO DE CAFÉ.

De manera general se puede decir que las plantas a las que se les aplicó el T3 tuvieron un mejor desempeño. Esto se explica por la incorporación, además de la fertilización con DAP y Calcinit, de aplicaciones foliares de Fruti-K y Stopit. Dichas aplicaciones resultaron en una incorporación inmediata de los nutrimentos a los fotosintatos y a la traslocación de estos a los lugares de mayor demanda (Trinidad & Aguilar, 1999) y, dado que se encontró una relación Ca:K de 0.9 (mala) y Mg:K 0.3 (mala), estas aplicaciones ayudaron a compensar esa condición (Sadeghian, 2022). Además, las aplicaciones foliares coincidieron con la etapa fenológica desarrollo del fruto y maduración del fruto y la semilla lo que ayudó a compensar la cantidad de energía y fotoasimilados requerida (Rodríguez et al., 2016).

Las plantas fertilizadas con T3 presentaron un peso promedio en cereza de 1.9 g, seguido por T2 (1.8 g), y luego T1, T4 y T5, cada uno con 1.7 g. Lo que coincidió con lo encontrado por Escamilla (2015) para cafés orgánicos.

El efecto del T4 sobre el rendimiento de café cereza destacó como el mejor al presentar un rendimiento promedio de 2,261.33 g. El efecto de T3 y T4 sobre el rendimiento fue similar (73 g de diferencia) seguido del T2 (1,582.33). Las plantas que fueron fertilizadas con T1 mostraron una diferencia negativa respecto al T5 (217.33) (Cuadro 10).

Cuadro 10. Rendimiento de café cereza para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilan de Serdán, Puebla.

Tratamiento	Bloque	Cereza	Promedio
1	1	1671	1,100.33
1	2	1436	
1	3	194	
2	1	1910	1,582.33
2	2	2344	
2	3	493	
3	1	3051	1,655.33
3	2	1423	
3	3	492	
4	1	2936	2,261.33
4	2	3078	
4	3	770	
5	1	1503	1,317.66
5	2	2092	
5	3	358	

Al evaluarse el rendimiento en pergamino, se encontró que las plantas tratadas con el T4 mostraron un mejor desempeño (551 g promedio), seguido del T1 (487 g promedio) y del T2 (451 g promedio) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Rendimiento de pergamino para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilan de Serdán, Puebla.

Tratamiento	Bloque	Pergamino	Promedio
1	1	356	487
1	2	402	
1	3	703	
2	1	596	451
2	2	408	
2	3	350	
3	1	590	551
3	2	335	
3	3	728	
4	1	487	226
4	2	59	
4	3	130	
5	1	147	145
5	2	197	
5	3	90	

Sin embargo, al hacer la evaluación agroindustrial de cereza a pergamino (C-P) encontramos que las plantas con T5 presentaron un mejor rendimiento (215), seguido de T4 (218), T3 (238), T2 (244) y por último T1 (264), es decir, que al evaluarse estas variables el tratamiento testigo fue el mejor (Cuadro 12).

Cuadro 12. Rendimiento agroindustrial de cereza a pergamino para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilan de Serdán, Puebla.

Tratamiento	Bloque	C-P	Promedio
1	1	270	264
1	2	273	
1	3	250	
2	1	283	244
2	2	212	
2	3	236	
3	1	228	238
3	2	244	
3	3	243	
4	1	247	218
4	2	189	
4	3	217	
5	1	192	215
5	2	225	
5	3	229	

Estos resultados concuerdan con lo mostrado por López-García et al., (2016), quienes registraron rendimientos entre 238 y 271 kg en condiciones climáticas similares a la zona de estudio.

La mejor eficiencia para conformar un quintal con menos granos (sacos de 45.5 kg) de café oro (López-García et al., 2016) se presentó al aplicar la fertilización del T1. Este tratamiento presento una conversión de 51 kg de café pergamino para un quintal de café oro seguido del T5 (56). Lo que significa que el T1 representa una alternativa al T5 (testigo) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Rendimiento agroindustrial de pergamino a verde para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilán de Serdán, Puebla.

Tratamiento	Bloque	P-V	Promedio
1	1	58	51
1	2	35	
1	3	60	
2	1	60	59
2	2	58	
2	3	58	
3	1	56	57
3	2	59	
3	3	56	
4	1	57	58
4	2	57	
4	3	60	
5	1	56	56
5	2	55	
5	3	56	

Por otro lado, al evaluar la relación entre el peso y la actividad de agua (AW; por sus siglas en inglés) mediante un análisis correlación de Pearson se encontró una relación significativa de 0.16 con una r cuadrada de 0.28, es decir, muestra una correlación baja (Badrumento et al., 2024). Esto puede deberse a la manipulación del grano mientras se realizaron las lecturas. Esto permitió analizar el efecto de los tratamientos sobre el peso del grano (oro) en 100 granos no encontrando diferencias significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 14).

Cuadro 14. Análisis de varianza (ANOVA) para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilán de Serdán, Puebla.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F	r²	DMS
Modelo	6	17.59968	2.93328	9.07	0.0033	0.87	1.60
Error	8	2.58805333	0.32350667				
Total	14	20.1877333					

De acuerdo con los estándares de la Specialty Coffee Association (2018), el café de especialidad se caracteriza por presentar una Aw inferior a 0.70, lo que indicó estabilidad frente al deterioro por microorganismos, obteniéndose en nuestro estudio una calidad óptima del grano de café (Cuadro 15).

Cuadro 15. Actividad de agua en 100 g de café oro para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilán de Serdán, Puebla.

Bloque	Tratamiento	AW
1	1	0.52
1	2	0.60
1	3	0.54
1	4	0.67
1	5	0.64
3	1	0.59
3	2	0.58
3	3	0.56
3	4	0.57
3	5	0.57
5	1	0.57
5	2	0.58
5	3	0.57
5	4	0.57
5	5	0.56

Además, estos resultados indicaron que el contenido de humedad ronda por el 12 % lo que facilita un mejor manejo durante el tostado para obtener un café suave (Mutovkina & Bredikhin, 2023; Specialty Coffee Association, 2018).

A pesar de estos estándares la evaluación física del grano en el presente estudio obtuvo porcentajes elevados de manchas, superando el 20 % (cuadro 16). Esto sugiere un posible manejo deficiente durante el proceso de secado y almacenamiento del grano, aunque se encuentra dentro de los intervalos observados en algunos países como Brasil (Mutovkina & Bredikhin, 2023; Puerta-Quintero, 2000). Estas manchas pueden ser eliminadas antes del tostado para evitar afectar la calidad de la bebida (Mendonça et al., 2009).

Cuadro 16. Análisis físico considerando el efecto de los tratamientos para café 'Geisha Enana' 2022 en Huitzilán de Serdán, Puebla.

Tratamiento	Bloque	Grano sano (%)	Mancha (%)
1	1	58	42
1	2	63	37
1	3	74	26
2	1	61	39
2	2	59	41
2	3	65	35
3	1	69	31
3	2	71	29
3	3	60	40
4	1	74	26
4	2	64	36
4	3	77	23
5	1	76	24
5	2	65	35
5	3	66	34

El efecto de T4 para grano sano presentó los mejores valores (72 %), seguido de T5 (69 %), T3 (67 %), T1 (65 %) y T2 (62 %)

Así mismo, el efecto de T4 para grano manchado fue el mejor (28.33 %), seguido de T5 (31.5 %), T3 (33.33 %), T1 (35 %) y por último T2 (38.33 %).

5.3.2. ANÁLISIS FÍSICO POR TRATAMIENTO.

Uno de los atributos evaluados en la cata de café, aunque de manera suplementaria, es el olor del grano (Specialty Coffee Association, 2023). En el caso del café pergamino, se distinguieron diferencias entre los efectos de los tratamientos. T1 presentó un olor a cítrico, mientras que T2, T3 y T4 mostraron notas a paja, y T5 a frutos secos. En el café oro, también se encontraron diferencias: T1 presentó olores a pepino y paja, T2 mostró olores a paja, pepino y chícharo, T3 y T5 a pepino y T4 a Chícharo. Este atributo es importante debido a que es indicador de la calidad del grano y del cuidado que se tuvo en el proceso de beneficiado húmedo (Monterroso, 2019).

Los granos de café oro, por efecto de los tratamientos, presentaron porcentajes de humedad entre el 11 y 12.6 %; porcentajes que indican densidades del grano entre 812 y 836 g/l parámetro que influye en la calidad de la bebida (Méndez-Parra et al., 2019), dado que, estas densidades, generan ajustes en el manejo durante el proceso de tostado para preservar la calidad del café (De Melo-Pereira et al., 2014; Mutovkina & Bredikhin, 2023; Puerta-Quintero, 2006). La actividad de agua osciló entre el 0.57 y el 0.73 lo que es congruente con los cafés de especialidad (Specialty Coffee Association, 2018).

El rendimiento promedio de cereza por planta (kg/planta) fue de 0.33. para la fertilización del T1, T2 y T3 presentaron rendimientos de 0.31, T4 de 0.48 y T5 de 0.25 dando rendimientos de pergamino a oro de entre 57 y 59 kg. Rendimientos por debajo de lo encontrado por López-García (2016). Él reporta rendimientos entre 2.8 y 8.2 kg/planta y rendimientos de pergamino a oro de 55.4 a 59.3 kg. Las diferencias podrían atribuirse a las variaciones climáticas, especialmente en las temperaturas y la precipitación anual (Bertrand et al., 2012; Morales et al., 2020; Viguera et al., 2017). Investigaciones previas han indicado que temperaturas superiores a 23 °C o inferiores a 18 °C, junto con precipitación mensual promedio por debajo de 125 mm/mes, pueden afectar el amarre y tamaño del fruto (Anand et al., 2014; Chaves-Barrantes & Gutiérrez-Soto, 2016). Se ha observado que el sombreado moderado o profundo ha sido asociado con la producción de granos más grandes (Morais et al., 2006), una

característica que se observó en las condiciones experimentales descritas por López-García et al., (2016).

La evaluación de rendimiento por tratamiento (g) se presenta en el cuadro 17.

Cuadro 17. Rendimiento (pergamino) y tamaño (Z) del grano de café (g) del ciclo 2022-2023 de ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Cosecha (kg/planta)	Z19	Europea (Z17, Z18)	Americana (Z15, Z16)	Z0
1	0.31	43	38	16	3
2	0.31	51	32	14	3
3	0.31	56	30	12	2
4	0.48	53	31	14	2
5	0.25	49	33	15	2

El tamaño del grano es una característica importante en el comercio, pues define el tipo de mercado al que puedes ingresar (europeo o americano) (Escamilla-Prado et al., 2015; López-García et al., 2016), siendo el mercado europeo el que exige granos grandes (zaranda 17 y 18); en cambio la preparación americana requiere granos de la zaranda 15 y 16 (López-García et al., 2016).

Existieron diferencias significativas en rendimiento al considerar el tamaño de las zarandas. Para la zaranda 19 se presentaron tres grupos (cuadro 18).

Cuadro 18. Comparación de medias para zaranda 19 (Z19) del ciclo 2022-2023 de café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Valores promedio para Z19	N	r^2	DMS
3	56.00 a	3	0.92	4.10
4	53.33 bc	3		
2	51.00 b	3		
5	49.33 b	3		
1	43.00 c C	3		

Medias con letras iguales de una misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Para la calidad europea (Z17 y 18) se formaron tres grupos (Cuadro 19).

Cuadro 19. Comparación de medias para calidad europea del ciclo 2022-2023 de ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Valores promedio para calidad europea	N	r^2	DMS
1	38.00A	3	0.88	3.46
5	33.33B	3		
2	31.66CB	3		
4	30.66CB	3		
3	29.66C	3		

Medias con letras iguales de una misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

En la calidad americana (Z15 y 16) se formaron dos grupos (Cuadro 20).

Cuadro 20. Comparación de medias para calidad americana del ciclo 2022-2023 de ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Valores promedio para calidad americana	N	r^2	DMS
1	316.33 A	3	0.73	2.94
5	14.66 A	3		
2	14.00BA	3		
4	14.00BA	3		
3	11.66B	3		

Medias con letras iguales de una misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Al evaluarse los defectos, las plantas del T1, en Z19, presentaron un mayor número de defectos primarios con diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 21).

Cuadro 21. Comparación de medias de defectos primarios para Z19 del ciclo 2022-2023 de ‘Geisha Enana’

Tratamiento	Valores promedio para defectos primarios		N	r^2	DMS
1	18.33A		3	0.80	6.16
5	16.33BA		3		
2	14.33BA		3		
4	12.00BC		3		
3	7.33C		3		

Medias con letras iguales de una misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Los defectos secundarios en grano no presentaron diferencias significativas con un coeficiente de variación de 23.12 y una DMS de 238.32, sin embargo, las plantas del T1 fueron las que presentaron un menor número de defectos secundarios (306.67) seguido de T5 (339), T2 (411.33), T3 (415) y por último T4 (446) (Cuadro 22).

Cuadro 22. Porcentaje de defectos y numero de defectos del ciclo 2022-2023 de café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Defectos							
	Prim	Z19 (%)	Secun	% Z19	Prim	Z0 (%)	Secun	Z0 (%)
1	18	2	307	42	13	11	62	63
2	7	1	411	49	18	12	64	64
3	12	1	415	44	9	7	50	74
4	14	2	446	50	13	9	59	80
5	16	2	339	40	15	13	51	67

Al pasar a la preparación europea, las plantas fertilizadas con T1 presentaron un mayor número de defectos primarios (Cuadro 23).

Cuadro 23. Comparación de medias de defectos primarios en preparación europea de ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Valores promedio de defectos primarios en preparación europea	N	r^2	DMS
1	49.00A	3	0.79	13.52
2	35.00B	3		
5	30.00B	3		
3	29.66B	3		
4	25.66B	3		

Medias con letras iguales de una misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Sin embargo, entre los tratamientos de la preparación americana no existieron diferencias significativas al considerar un coeficiente de variación de 34.62 y una DMS de 19.53. Sin embargo, las plantas con el T2 fueron las que mayor número de defectos presentó (30.66), seguido de T1 (20.66), T4 (19.00), T3 (18.33) y por último T5 (16.33) (Cuadro 24).

Cuadro 24. Porcentaje de defectos primarios y secundarios en preparación europea y americana de café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Europea				Americana			
	Prim	%	Secun	%	Prim	%	Secun	%
1	43	5	298	40	15	4	127	33
1	55	7	436	54	29	6	280	66
1	49	5	429	54	18	4	280	74
2	36	4	325	47	33	9	175	50
2	36	5	343	51	24	6	186	54
2	33	5	391	62	35	8	232	65
3	31	5	294	51	28	6	165	56
3	28	4	313	53	15	5	172	65
3	30	5	399	65	12	3	173	71
4	23	3	320	53	24	6	218	62
4	35	5	503	78	18	5	205	71
4	19	3	392	64	15	4	228	72
5	26	4	322	48	15	4	189	54
5	30	3	373	53	8	3	192	55
5	34	4	385	55	26	6	194	54

Refiriéndose a las anormalidades de los granos, ningún tratamiento tuvo efecto en la presencia de granos tipo planchuela, triángulo y caracol; el efecto de estos tratamientos no presentó diferencias significativas (Cuadro 25).

Cuadro 25. Porcentaje de anormalidades del grano de la cosecha 2022-2023 de café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	Planchuela	Triángulos	Concha	Caracol
1	85.5	4.6	1.9	8.5
1	94.7	0.9	1.3	3.2
1	94.8	1.0	1.5	2.6
2	93.9	0.6	1.1	5.5
2	90.8	0.5	1.1	7.1
2	84.3	2.5	1.3	10.7
3	91.5	0.8	1.3	6.1
3	94	0.5	0.5	4.2
3	94.5	0.3	0.6	3.6
4	93.3	0.3	0.7b	5.3
4	95.3	0.1	1.1	3.7
4	94.8	0.4	0.8	3.3
5	91.5	0	1.3	7.1
5	91.6	0.1	1.1	7.4
5	91.6	0.2	0.8	6.9

El análisis de componentes principales (PCA) mostró que las plantas del T5 y T1 tienen efectos similares al obtener granos que ocupan la zaranda 18 y 16. Sin embargo, las plantas fertilizadas con el T1 muestran mayor relación con los defectos en la zaranda 19. Por otro lado, las plantas con el T2 se reflejan presentan un mayor porcentaje de defectos primarios lo mismo que una mayor concentración de granos caracol. Las plantas con T3 y T4 mostraron efectos similares en planchuela, peso en pergamino y en verde (Figura 10).

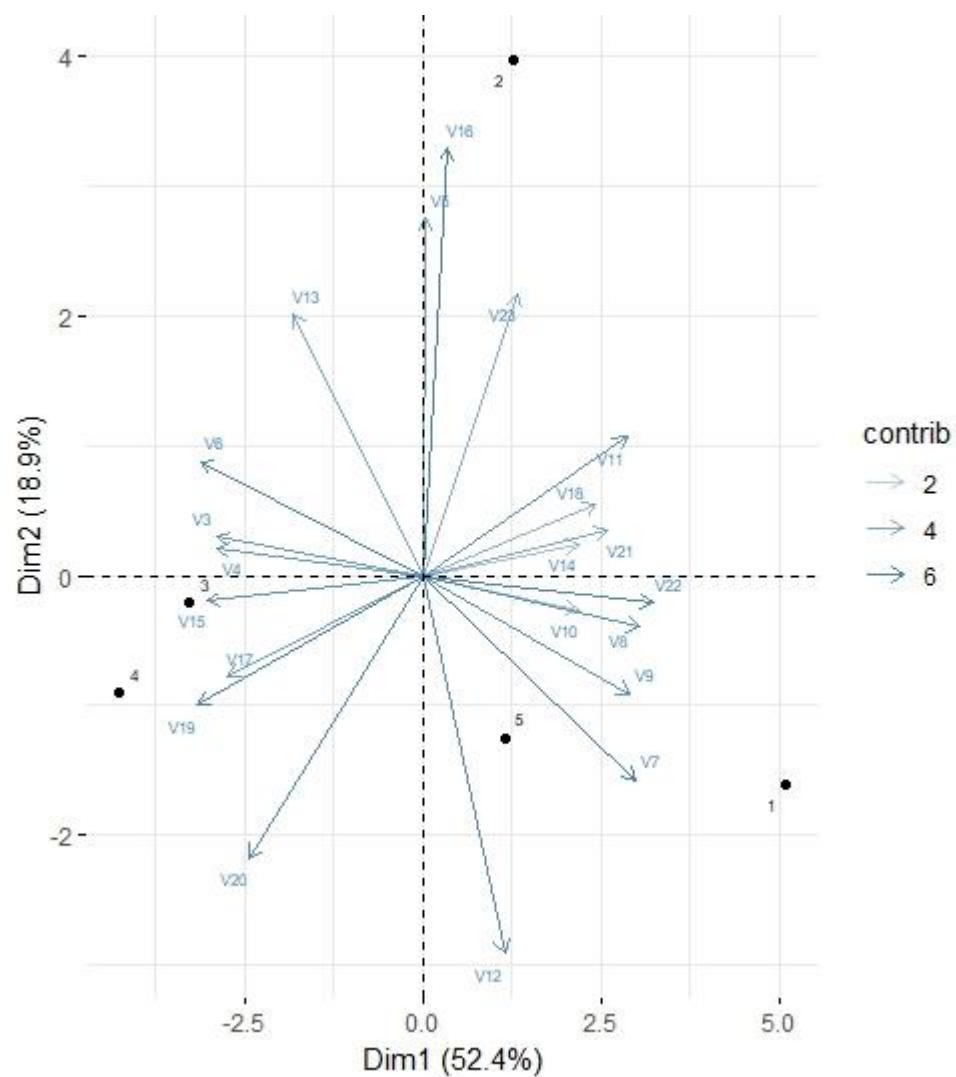


Figura 10. Diagrama de variables físicas en café ‘Geisha Enana’.

La tabla de defectos (V) se muestra en el cuadro 26.

Cuadro 26. Variables físicas del PCA para café 'Geisha Enana'.

Variable	Nomenclatura
Porcentaje de humedad	V1
Actividad del agua (AW)	V2
Peso en pergamino	V3
Peso en grano verde	V4
Rendimiento agroindustrial CV/CP	V5
Z19	V6
Z18	V7
Z17	V8
Z16	V9
Z15	V10
Z0	V11
Porcentaje de Z19 para defectos primarios	V12
Porcentaje de Z19 para defectos secundarios	V13
Porcentaje de defectos primarios en preparación europea	V14
Porcentaje de defectos secundarios en preparación europea	V15
Porcentaje de defectos primarios en preparación americana	V16
Porcentaje de defectos secundarios en preparación americana	V17
Porcentaje de Z0 para defectos primarios	V18
Porcentaje de Z0 para defectos secundarios	V19
Granos tipo planchuela	V20
Granos tipo triángulos	V21
Granos tipos concha	V22
Granos tipo caracol	V23

La correlación obtenida nos muestra que las variables que mayor efecto tienen son 6 (Cuadro 27).

Cuadro 27. Porcentaje de anormalidades del grano de café en la cosecha 2022-2023.

Variables	Correlación	P
Concha	0.95	0.01
Z17	0.89	0.03
Z18	0.88	0.04
Defectos secundarios (europea)	-0.88	0.04
Z19	-0.91	0.02
Defectos secundarios (Z0)	-0.92	0.02

5.3.3. ANÁLISIS SENSORIAL DEL CAFÉ (BEBIDA)

La humedad del grano rondó los 11.5 y 12.8. La Aw fue de 0.67 a 0.71. El mejor rendimiento de verde a tostado se presentó con el T3 y T4 (86.2 g/100 g) indicador de tuestes medios (Osorio & Pabón, 2022; Wu et al., 2024) (Cuadro 28).

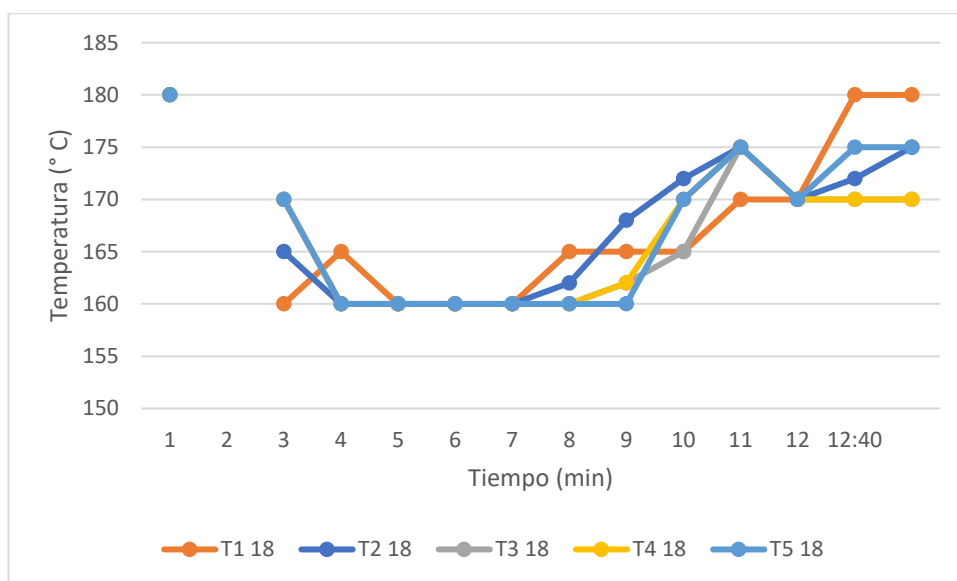
Cuadro 28. Temperatura de tueste e indicadores de grano oro.

Factor	T1	T2	T3	T4	T5
Humedad	11.5	12.8	12.7	12.4	12.8
AW	0.7	0.71	0.67	0.67	0.68
Peso verde	100	100	100	100	100
Peso tostado	86	85.2	86.2	86.2	85.3
Rendimiento (%)	86	85.2	86.2	86.2	85.3
T°C Ingreso	180	180	180	180	180
Min					
1	160	165	170	170	170
2	165	160	160	160	160
3	160	160	160	160	160
4	160	160	160	160	160
5	160	160	160	160	160
6	165	162	160	160	160
7	165	168	162	162	160
8	165	172	165	170	170
9	170	175	175	175	175
10	170	170	170	170	170
11	180	172	170	170	175
12*	180	175	170	170	175

*El tiempo de finalización fue distinto para cada tratamiento. Los datos se presentan en la gráfica de curva de tueste.

El grado de tueste fue definido por el color del grano en 55-65 en la escala AGTRON/SCA. T1, T2, T3 y T5 presentaron 65. T4 presentó 55. La temperatura inicial utilizada no es la recomendada por la SCA, sin embargo, la temperatura establecida no dificulta las reacciones de Maillard y la pirolisis (Osorio & Pabón, 2022). El tiempo establecido es el recomendado por la SCA (Specialty Coffee Association, 2003) (Grafica 1).

Grafica 1. Curva de tueste de café ‘Geisha Enana’.



La bebida obtenida de los granos de la planta fertilizada con T4 presentó luminosidades más oscuras y tendencia al color azul mientras que los frutos del T3 presentaron tonos más rojos (Cuadro 29).

Cuadro 29. Color de grano molido de café ‘Geisha Enana’.

Tratamiento	L	Croma	Angulo
1	14.32	30.94	52.91
1	14.25	30.84	52.75
1	15.06	31.39	55.79
2	14.54	31.43	52.83
2	14.41	31.32	52.49
2	14.45	31.35	52.56
3	18.59	35.18	65.61
3	18.66	35.29	65.69
3	18.71	35.37	65.72
4	7.95	27.50	29.81
4	7.96	27.52	29.88
4	7.98	27.50	29.98
5	18.08	36.03	59.86
5	18.1	36.06	59.89
5	18.17	36.14	60.04

El análisis de componentes principales de la cata muestra que el efecto del T1 es distinto a T5, mientras que presenta similitudes con el efecto del T4. La bebida de café resultante del T2 permanece sin coincidir con ningún tratamiento (Figura 11).

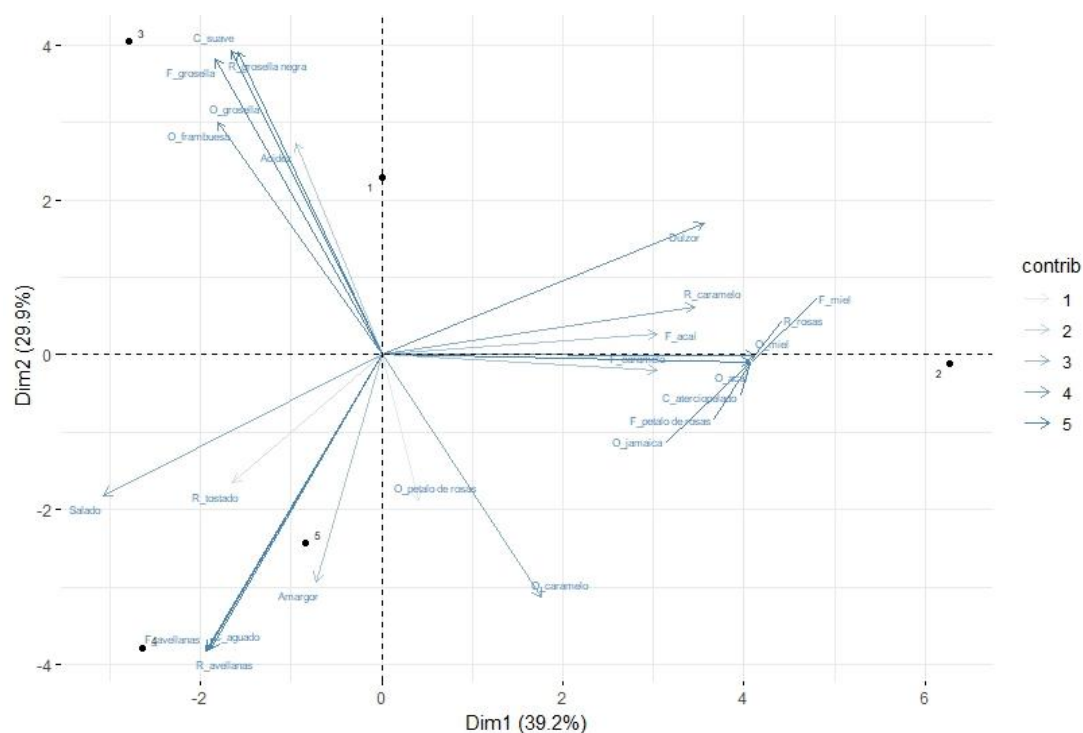


Figura 11. Diagrama de las variables y tratamientos en el PCA.

El comportamiento de la dimensión dos del PCA, que explica el 39.2 % de los resultados se debe principalmente al olor a miel y el regusto a rosas, presentes en la bebida resultado del T2 (Cuadro 30).

Cuadro 30. Variables principales de la cata.

Dimensión 1	Correlación	P. value
O_miel	0.95	0.01
R_rosas	0.94	0.01
O_acaí	0.94	0.01
C_aterciopelado	0.94	0.01
F_pétalo de rosas	0.94	0.01
O_jamica	0.94	0.01
F_miel	0.94	0.01
Dimensión 2		
C_suave	0.91	0.02
R_grosella negra	0.90	0.03
F_grosella	0.88	0.04
C_aguado	-0.88	0.04
R_avellanas	-0.88	0.04
F_avellanas	-0.88	0.04

Las diferencias en la dimensión dos se muestran debido al cuerpo suave y regusto a grosella negra presente en T3 y T1. El cuerpo aguado, regusto a avellanas y sabor a avellanas afectan de manera negativa a T4 y T5.

5.4. CONCLUSIONES

Se debe considerar una evaluación por más tiempo de los tratamientos, ya que, aunque no se observaron diferencias significativas en el rendimiento de cereza y pergamino, las diferencias cuantitativas entre tratamientos son notables. Además, la mejora del sistema de producción mediante un manejo más eficiente de la sombra podría potenciar los resultados de los tratamientos.

El uso de fertilización orgánica (composta), se presenta como una alternativa a la fertilización química, dado su desempeño estadísticamente significativo, en el rendimiento de pergamino a oro con respecto a los demás tratamientos. Esta opción puede contribuir a reducir los costos de producción sin menoscabar producción.

Sin embargo, es importante señalar que la calidad física del grano se vio afectada por el manejo postcosecha, específicamente en el secado y almacenamiento, lo que complicó la evaluación de los efectos de los tratamientos.

Sin embargo, se observaron diferencias en el tamaño y distribución del grano en las zarandas.

En cuanto a la calidad de la bebida, se observa que el tratamiento dos podría ser una opción viable para incursionar en mercados de café de especialidad, al favorecer la presencia de notas aromáticas a miel y rosas. Además, el tratamiento uno destaca como alternativa, con notas a frambuesa y un cuerpo suave, en contraste con el tratamiento cinco, que presenta notas a avellanas y un cuerpo aguado.

5.5. LITERATURA CITADA

- Anand, C. G., Kumar, P., & D'souza, G. F. (2014). Pre-mature fruit drop and coffee production in India: A review. *Indian Journal of Plant Physiology*, 19(3), 230-237. <https://doi.org/10.1007/s40502-014-0102-y>
- Badrunanto, Wahyuni, W. T., Farid, M., Batubara, I., & Yamauchi, K. (2024). Antioxidant components of the three different varieties of Indonesian ginger essential oil: In vitro and computational studies. *Food Chemistry Advances*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100558>
- Bertrand, B., Boulanger, R., Dussert, S., Ribeyre, F., Berthiot, L., Descroix, F., & Joët, T. (2012). Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. *Food Chemistry*, 135(4), 2575-2583. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.060>
- Bicho, N. C., Leitão, A. E., Ramalho, J. C., & Lidon, F. C. (2012). Chemical descriptors for sensory and parental origin of commercial *Coffea* genotypes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(7), 835-842. <https://doi.org/10.3109/09637486.2012.676027>
- Borém, F. M., Ribeiro, F. C., Figueiredo, L. P., Giomo, G. S., Fortunato, V. A., & Isquierdo, E. P. (2013). Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. *Journal of Stored Products Research*, 52, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2012.08.004>
- Bote, A. D., & Vos, J. (2017). Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. *Wageningen Journal of Life Sciences*, 83(1), 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.09.002>
- Burgos, E. R., Cano, G. A. V., & Salazar, J. C. S. (2014). Fuentes de variación que tienen efecto sobre los atributos sensoriales de taza en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *Agricultural and Food Sciences*, (1), 64-77. <https://www.semanticscholar.org/paper/Fuentes-de-variación-que-tienen-efecto-sobre-los-de-Burgos-Cano/d893de034506ec5345964cfb0aa0dfcf9f080c24>
- Canet-Brenes, G., & Soto-Viquez, C. (2017). *Caficultura: Panorama actual en América Latina*. Biblioteca Básica de Agricultura (BBA). <http://repositorio.iica.int/handle/11324/6437>
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2016). Respuestas al estrés por calor en los cultivos: Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- De Melo-Pereira, G. V., Thomaz-Soccol, V., Pandey, A., Pedroni-Medeiros, A. B., Andrade-Lara, J. M. R., Gollo, A. L., & Soccol, C. R. (2014). Isolation, selection and evaluation of yeasts for use in fermentation of coffee beans by the wet process. *International Journal of Food Microbiology*, 188, 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.07.008>

- Decazy, F., Avelino, J., Guyot, B., Perriot, J. J., Pineda, C., & Cilas, C. (2003). Quality of different Honduran coffees in relation to several environments. *Journal of Food Science*, 68(7), 2356-2361. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05772.x>
- Escamilla-Prado, E., Ruiz-Rosado, O., Zamarripa-Colmenero, A., & González-Hernández, V. A. (2015). Calidad en variedades de café orgánico en tres regiones de México. *Revista de Geografía Agrícola*, 55 (1), 45-55. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2015.55.004>
- Febrianto, N. A., & Zhu, F. (2023). Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. *Food Chemistry*, 412, Article 135489. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135489>
- Khemira, H., Medebesh, A., Hassen Mehrez, K., & Hamadi, N. (2023). Effect of fertilization on yield and quality of Arabica coffee grown on mountain terraces in southwestern Saudi Arabia. *Scientia Horticulturae*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112370>
- López-García, F. J., Escamilla-Prado, E., Zamarripa-Colmenero, A., & Cruz-Castillo, J. G. (2016). Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 297-304. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.297-304>
- Méndez-Parra, R. M., Carmona-Tabares, P. C., & Molina-Díaz, O. E. (2019). Evaluación del efecto de tres niveles de tosti3n en la calidad en taza de algunas variedades de café de la especie *Coffea arabica* L. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 31(1), 54-61. <https://doi.org/10.33975/riuq.vol31n1.277>
- Mendonça, J. C. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2009). Physical characterization of non-defective and defective Arabica and Robusta coffees before and after roasting. *Journal of Food Engineering*, 92(4), 474-479. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.023>
- Monsalve-Vásquez, M. (2022). Eficacia de sistemas expertos en la selección de granos de café (*Coffea arabica*): Una revisión sistemática. *Amazonía Digital*, 1(1). Article e163. <https://doi.org/10.55873/rad.v1i1.163>
- Monterroso, J. L. Y. (2019). *Monitoreo nacional de calidad* [Folleto]. <https://www.anacafe.org/uploads/file/5710d499bb3a4f2a97c206b1d9b6311d/Boletin-CEDICAFE-Junio-2019.pdf>
- Morais, H., Caramori, P. H., Ribeiro, A. M. D. A., Gomes, J. C., & Koguishi, M. S. (2006). Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(5), 763-770. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500007>
- Morales, E. R., Chávez, S. Q., Veneros, J. G., Díaz, E. O., Sánchez, T. S., & García, M. Rosero., (2020). Efectos del cambio climático en fincas cafetaleras: Una revisión bibliográfica con énfasis en Perú. *Revista de Investigación Apuntes Universitarios*, 11(1), 55-71. <https://doi.org/10.17162/au.v11i1.547>

- Mutovkina, E. A., & Bredikhin, S. A. (2023). Analysis of coffee thermophysical changes during roasting using differential scanning colorimetry. *Food Science and Technology*, 43, Article e119722. <https://doi.org/10.1590/fst.119722>
- Ortega, A., & Pino, J. (2017). Revisión de las tendencias en las publicaciones relacionadas con la microextracción en fase sólida y el aroma y sabor de los alimentos durante 1992-2016. *Ciencia y tecnología de alimentos*, 27(3), 37-41. <https://revcitecal.iiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/115>
- Osorio, V., & Pabón, J. (2022). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la calidad sensorial del café. *Revista Cenicafé*, 73(1), Article e73102. <https://doi.org/10.38141/10778/73102>
- Osorio, V., Pabón, J., Calderón, P. A., & Imbachi, L. C. (2021). Calidad física, sensorial y composición química del café cultivado en el departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 72(2), Article e72201. <https://doi.org/10.38141/10778/72201>
- Pabón, J. P. U. , & Osorio, V. P. (2019). *Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café* [Folleto]. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream>
- Puerta-Quintero, G. I. (2000). *Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida*.
- Puerta-Quintero, G. I. (2006). *La humedad controlada del grano preserva la calidad del café* [Folleto técnico]. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/418/1/avt0352.pdf>
- Puerta-Quintero, G. I. (2013). *Calidad del café*. [Folleto técnico]. https://biblioteca.cenicafe.org/jspui/bitstream/10778/4346/1/cenbook-0026_30.pdf
- Ramírez-Builes, V. H. (2014). *La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones* [Folleto técnico]. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0441.pdf>
- Ramos, L. J., & Criollo, H. (2017). Calidad física y sensorial de Coffea arábica L. variedad Colombia, perfil Nespresso AAA, en la Unión, Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(2). <https://doi.org/10.22267/rcia.173402.74>
- Rizzuto, Q., & Liliana, M. (2014). El mercado mundial del café: Tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad. *Visión Gerencial*, 2, 291-307. <https://biblat.unam.mx/hevila/Visiongerencial/2014/no2/7.pdf>
- Rodríguez, L. A. L., Guevara, F. H., Gómez, H. C., Fonseca, M. F., Gómez, J. C. C., & Pinto, R. R. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronómica*, 65(3), 248-254. <https://doi.org/doi:http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.46731>
- Rosas-Arellano , J., Escamilla-Prado, E., & 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. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57313051010.pdf>

- Sadeghian, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. (1.^{ra} ed.). Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>
- Silva, S. D. A., & Lima, J. S. D. S. (2012). Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. *Revista Ceres*, 59(2), 271-277. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200017>
- Specialty Coffe Association. (2023). *El valor del catador de café de especialidad: Perspectivas, papeles y competencias profesionales* [Folleto técnico]. https://static1.squarespace.com/static/584f6bbef5e23149e5522201/t/6435c857ebe2951fc8ac791e/1681246295781/SCA_CuppingWhitepaper_SP_V3.pdf
- Specialty Coffee Association. (2003). *Cupping Protocols. Protocols & Best Practices*. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>
- Specialty Coffee Association. (2018a). *Manual: El café Arábica lavado Guía de defectos del café verde* (3^{ra} ed). SCA_The-Arabica-Green-Coffee-Defect-Guide_Spanish_updated.pdf (bootcoffee.com)
- Suárez-Salazar, J. C., Rodríguez-Burgos, E., & Duran-Bautista, E. H. (2015). Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. *Acta Agronómica*, 64(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.44641>
- Trinidad, A. S., & Aguilar, D. M. (1999). Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra latinoamericana*, 17(3), 247-255. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57317309>
- Viguera, B., Martínez-Rodríguez, R., Donatti, C., Harvey, C., & Alpízar, F. (2017). *Impactos del cambio climático en la agricultura de Centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación* [Manual]. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9476/Impactos_del_cambio_climatico_modulo2.pdf?sequence=1
- Vinecky, F., Davrieux, F., Mera, A. C., Alves, G. S. C., Lavagnini, G., Leroy, T., Bonnot, F., Rocha, O. C., Bartholo, G. F., Guerra, A. F., Rodrigues, G. C., Marraccini, P., & Andrade, A. C. (2017). Controlled irrigation and nitrogen, phosphorous and potassium fertilization affect the biochemical composition and quality of Arabica coffee beans. *The Journal of Agricultural Science*, 155(6), 902-918. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000988>
- Worku, M., De Meulenaer, B., Duchateau, L., & Boeckx, P. (2018). Effect of altitude on biochemical composition and quality of green arabica coffee beans can be affected by shade and postharvest processing method. *Food Research International*, 105, 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.016>
- Wu, H., Gonzalez Viejo, C., Fuentes, S., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2024). Evaluation of spontaneous fermentation impact on the physicochemical properties and sensory profile of green and roasted arabica coffee by digital technologies. *Food Research International*, 176, 113800. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113800>

