

Fertilización con Azufre como Estrategia de Biorremediación Fitosanitaria en Cacao Sulfur Fertilization as a Phytosanitary Bioremediation Strategy in Cacao

Favio Eduardo Herrera-Eguez^{1†}, Carlos Augusto Morales-Paredes¹,
Camila Patricia Herrera-Figueroa² y Ángel Josué Macías-Cerezo³

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Fitopatología. Vía Quevedo-El Empalme km 7, Campus "La María". 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (F.E.H.E), (C.A.M.P.).

[†] Autor para correspondencia: fherrerae@uteq.edu.ec

² Universidad de las Américas, Facultad de Medicina. Redondel del Ciclista, antigua vía a Nayón, Campus "UDLA Park". 100124 Quito, Pichincha, Ecuador; (C.P.H.F.).

³ Unidad Educativa Zurich Science. Av. June Guzmán, Edificio Ipersa, tercer piso alto, Sector Centro. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (A.J.M.C.).

RESUMEN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye un pilar económico en Ecuador, cuya productividad depende en gran medida del manejo nutricional y fitosanitario. La fertilización deficiente puede aumentar la susceptibilidad a enfermedades, afectando negativamente el rendimiento. En este contexto, el azufre (S) se plantea como una alternativa sostenible para mejorar la sanidad del cultivo. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de distintas dosis de azufre sobre la incidencia de enfermedades y el rendimiento agronómico del cacao, variedad CCN-51. El ensayo se desarrolló en una plantación de 10 años, utilizando un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con cuatro tratamientos: T1 (testigo, 0 kg ha⁻¹ S), T2 (60 kg ha⁻¹ S), T3 (90 kg ha⁻¹ S) y T4 (120 kg ha⁻¹ S). La aplicación de azufre se realizó de forma fraccionada, y se evaluaron variables agronómicas, de rendimiento y fitosanitarias mediante escalas visuales y el software Leaf Doctor (Pethybridge y Nelson, 2015). La dosis de 60 kg ha⁻¹ (T2) destacó por disminuir la severidad de ambas enfermedades, incrementar el número de mazorcas sanas y presentar una relación beneficio/costo favorable (1.13). No obstante, el impacto del azufre sobre el rendimiento requiere mayor investigación para establecer recomendaciones definitivas. Este estudio aporta evidencia sobre el potencial del azufre como biorremediador en sistemas productivos de cacao, destacando su valor en la reducción de enfermedades fúngicas sin comprometer la sostenibilidad del sistema. Se concluye que el manejo nutricional con azufre puede mejorar la sanidad del cultivo, ofreciendo una alternativa viable para productores en suelos ecuatorianos afectados por problemas fitosanitarios.

Palabras clave: mazorca negra, monilophthora, moniliasis, phytophthora, roreri.

SUMMARY

The cultivation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) is an economic pillar in Ecuador, whose productivity depends largely on nutritional and phytosanitary management. Deficient fertilization can increase susceptibility to diseases, negatively affecting yield. In this context, sulfur (S) has been proposed as a sustainable alternative to improve crop health. The present study aimed to evaluate the effect of different sulfur doses on disease incidence and the agronomic yield of cocoa, variety CCN-51. The trial was conducted in a 10-year-old plantation using a completely randomized block design (CRBD) with four treatments: T1 (control, 0 kg ha⁻¹ S), T2 (60 kg ha⁻¹ S), T3 (90 kg ha⁻¹ S), and T4 (120 kg ha⁻¹ S). Sulfur was applied in split applications, and agronomic, yield, and phytosanitary variables were evaluated using visual scales and Leaf Doctor software (Pethybridge y Nelson, 2015). The dose of 60 kg ha⁻¹ (T2) stood out by decreasing the severity of both diseases, increasing the number of healthy pods, and



Cita recomendada:

Herrera-Eguez, F. E., Morales-Paredes, C. A., Herrera-Figueroa, C. P., & Macías-Cerezo, A. J. (2026). Fertilización con Azufre como Estrategia de Biorremediación Fitosanitaria en Cacao. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-13. e2427. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2427>

Recibido: 8 de octubre de 2025.
Aceptado: 30 de enero de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Mayo de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

presenting a favorable benefit/cost ratio (1.13). However, the effect of sulfur on yield requires further research to establish definitive recommendations. This study provides evidence of the potential of sulfur as a bioremediating agent in productive cocoa systems, highlighting its value in reducing fungal diseases without compromising system sustainability. It is concluded that sulfur-based nutritional management can improve crop health, offering a viable alternative for producers in Ecuadorian soils affected by phytosanitary problems.

Index words: *lack pod, monilophthora, moniliasis, phytophthora, roreri.*

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye uno de los cultivos tropicales más relevantes a nivel mundial, tanto por su valor económico como por su impacto sociocultural en las regiones productoras. Originario de América, su domesticación se remonta a más de 5000 años, y actualmente involucra a más de cinco millones de agricultores en el mundo, siendo África Occidental, América Latina y Asia sus principales zonas de cultivo (ICCO, 2021; Zarrillo *et al.*, 2018). Ecuador ocupa un lugar destacado como productor de cacao fino de aroma, representando más del 60% de la oferta mundial de este tipo, lo que le confiere una ventaja competitiva en los mercados internacionales por la calidad sensorial de sus granos (ANECACAO, 2021; Córdova-Durán, 2025). La cadena de producción del cacao ecuatoriano está compuesta mayoritariamente por pequeños productores, quienes cultivan variedades como el tipo Nacional en sistemas agroforestales, y el clon CCN 51 en monocultivos de alta productividad, aunque de menor calidad (García-Briones, Pico-Pico y Jaimez, 2021; Sornoza-Vélez *et al.*, 2022; Crespo del Campo y Crespo-Andía, 1997). Sin embargo, desafíos como el cambio climático, la regulación internacional sobre cadmio, y la volatilidad de los precios globales afectan la sostenibilidad del sector. Además, la comercialización se caracteriza por una fuerte intermediación, donde el productor recibe una fracción limitada del valor final, y la transformación industrial aún es incipiente, limitando el valor agregado nacional (Alcívar-Córdova, Quezada-Campoverde, Barrezueta-Unda, Garzón-Montealegre y Carvajal-Romero, 2021; Parada-Gutiérrez y Veloz-Cordero, 2021). En este contexto, fortalecer la resiliencia de la cadena productiva requiere acciones integradas que consideren el entorno rural, la asociatividad, la diferenciación de calidad, y la investigación orientada al mejoramiento genético y agroecológico.

El cultivo de cacao enfrenta amenazas persistentes por enfermedades que comprometen hasta el 40% de la producción anual global (ICCO, 2019; Ploetz, 2016). Entre los patógenos más devastadores se encuentran *Monilophthora perniciosa*, agente causal de la enfermedad de la escoba de bruja (WBD), y *Monilophthora roreri*, responsable de la moniliasis o frosty pod rot, ambas con impactos históricos en Ecuador y Brasil, donde se han registrado pérdidas de hasta el 70% en rendimiento (Meinhardt *et al.*, 2008). Otros agentes relevantes incluyen *Phytophthora palmivora* y *P. megakarya*, causantes de la pudrición negra de la mazorca, y el virus del brote hinchado del cacao (CSSV), transmitido por cochinillas (Muller y Sackey, 2005; Muller, 2016). La biología de estos patógenos revela mecanismos complejos de infección, como la manipulación del metabolismo del hospedero por *M. perniciosa* y la liberación de zoosporas en *Phytophthora* spp. (Mondego *et al.*, 2008; Perrine-Walker, 2020). Frente a estos desafíos, se han desarrollado estrategias de control que incluyen el uso de agentes de biocontrol como *Trichoderma harzianum* y *T. asperellum* (Smith, 2005; Rojo, Reynoso, Ferez, Chulze y Torres, 2007; Cortes, Torrejano, Ceron, y Díaz, 2025), compost de cáscara de cacao (Doungous, Minyaka, Longue y Nkengafac, 2018), y herramientas genéticas como marcadores SNP asociados a tolerancia (Gutiérrez *et al.*, 2021). No obstante, persisten brechas entre los avances moleculares y su aplicación en campo, especialmente en regiones con menor acceso a recursos, lo que limita la escalabilidad de soluciones sostenibles (Bukari *et al.*, 2025). En los sistemas productivos de la provincia de Los Ríos destacan la *Phytophthora* y la monilia como las enfermedades predominantes.

La moniliasis es causada por el hongo *Monilophthora roreri*, un basidiomiceto perteneciente a la familia Marasmiaceae, que se caracteriza por su alta capacidad de diseminación y severos efectos sobre los frutos, especialmente en etapas tempranas de desarrollo. El hongo penetra el fruto, coloniza intracelularmente los tejidos del parénquima cortical y eventualmente produce síntomas visibles como deformaciones, manchas marrones y micelio blanco sobre la superficie (Álvarez, Martínez y Coy, 2014). La infección por *M. roreri* está condicionada por factores ambientales, destacándose la humedad y temperaturas superiores a 24 °C como elementos clave para la germinación de conidios (Evans, 2007). La mazorca negra, por otro lado, es causada por especies del género *Phytophthora*, siendo *P. palmivora* y *P. megakarya* las más relevantes. Esta enfermedad presenta un ciclo de vida corto, con síntomas que incluyen manchas color chocolate y necrosis en raíces y cuello del tallo.

Las condiciones ambientales templadas y húmedas favorecen su desarrollo, y puede completarse en menos de cuatro días en condiciones favorables (Walker y van West, 2007). Estas enfermedades generan pérdidas económicas significativas al disminuir la productividad y calidad del grano, por lo que su manejo integrado es una prioridad en los sistemas de producción. Ambas enfermedades tienen en común que su fuente de inóculo principal son los remanentes de esporas provenientes del suelo o de rastrojos de mazorcas enfermas sin removerse por lo que un método de biorremediación eficiente sugiere ser la fertilización edáfica.

El manejo fitosanitario del cacao puede verse favorecido por la nutrición mineral, siendo el azufre (S) uno de los elementos con efectos positivos comprobados tanto en el crecimiento de la planta como en la reducción de la severidad de enfermedades. El azufre participa en procesos metabólicos fundamentales, como la síntesis de aminoácidos esenciales (cisteína, metionina), la producción de clorofila, aceites y vitaminas, además de intervenir en mecanismos de defensa vegetal (Williams y Cooper, 2004). En el suelo, el azufre se encuentra en formas orgánicas e inorgánicas, siendo absorbido por las plantas principalmente como sulfato (SO_4)²⁻ (Ventimiglia, Carta y Rillo, 2004). Diversos estudios han demostrado que la fertilización con azufre mejora el rendimiento del cultivo de cacao. Montes-Mosquera (2016¹) evidenció que la aplicación conjunta de DAP y sulfato de amonio aumentó significativamente el rendimiento de mazorcas en cacao CCN-51, alcanzando hasta 1539 kg ha⁻¹. Asimismo, Singh et al. (2013) determinó que las dosis de 0, 2, 4 y 8 kg P ha⁻¹, observando que en dosis altas (8 kg ha⁻¹) la concentración de fósforo aumentó y se reflejó en más rendimiento. Más allá del cacao, investigaciones en cultivos hortícolas como cebolla y arándano también han mostrado que el azufre mejora la productividad y controla patógenos como *Oidium* sp. con eficacias superiores al 50% (Álvarez-Romero, 2021²). Además de sus efectos nutricionales, el azufre presenta propiedades biocidas, actuando directamente sobre patógenos. Se han identificado diversos compuestos sulfurados como el azufre elemental, disulfuros y tiosulfatos con actividad fungicida. La acción fungitóxica del azufre se ha atribuido a su interferencia en la cadena respiratoria mitocondrial de los hongos, su capacidad de oxidar grupos sulfidrilos esenciales en proteínas respiratorias, y la generación de sulfitos tóxicos (Williams y Cooper, 2004). Esta función es de gran interés en el contexto del manejo integrado de enfermedades del cacao, ya que el uso de azufre puede constituirse como una estrategia ecológica y económica. Los requerimientos específicos de azufre del cultivo de cacao varían según la edad de la planta y la fertilidad del suelo. En suelos de baja disponibilidad de nutrientes, se recomienda los clones INIAP-EETP-800 e INIAP-EETP-801 como clones superiores al CCN-51 al tener rendimientos superiores (Sornoza-Vélez et al., 2022). La deficiencia de azufre puede manifestarse mediante síntomas similares a los del nitrógeno, como clorosis en hojas jóvenes y necrosis apical, lo cual afecta el crecimiento y desarrollo del cultivo (González, Sadeghian y Mejía, 2013). Sin embargo, al ser un elemento tan complejo su evaluación en la biorremediación del suelo para el control de enfermedades suele ser complejo y varía mucho entre los diferentes investigadores.

La evaluación precisa de la severidad de las enfermedades en plantas es esencial para estimar pérdidas, realizar diagnósticos oportunos, establecer umbrales de intervención, mejorar el entendimiento epidemiológico y validar estrategias de manejo (Madden, Hughes y Bosch, 2007; Bock et al., 2010). La severidad, definida como el porcentaje de tejido afectado, ha sido tradicionalmente estimada de forma visual, lo que la hace susceptible a errores sistemáticos, variabilidad entre evaluadores y sesgos cognitivos (Nutter, Esker y Netto, 2006; Bock et al. 2010; Chiang, Liu y Bock, 2016). Aunque herramientas como los diagramas de área estándar (SADs) han mejorado la precisión de estas estimaciones (Del Ponte et al., 2017), el procesamiento de imágenes mediante sensores ópticos representa una alternativa prometedora. Tecnologías como la captura en espectro visible (VIS), hiperespectral (HSI) y multiespectral (MSI) permiten cuantificar la enfermedad de forma automatizada, objetiva y escalable, basándose en firmas espectrales asociadas al tejido enfermo (Mahlein, Steiner, Dehne y Oerke, 2010; Barbedo, 2013; Simko, Jimenez y Sirault 2017). Estas metodologías han demostrado alta precisión en condiciones controladas y, con el apoyo de inteligencia artificial, podrían superar los desafíos de variabilidad en campo, contribuyendo al avance de la fenotipificación de alta resolución y la agricultura de precisión (Mutka y Bart, 2015; Mahlein, 2016; Bock et al., 2010).

El objetivo general del presente estudio es evaluar la influencia de la aplicación de azufre como un biorremediador en el manejo fitosanitario del cultivo de *Theobroma cacao* L., variedad CCN-51. Específicamente, se plantea: i) analizar el efecto del azufre en la reducción de la incidencia y severidad de las principales enfermedades fúngicas que afectan al cultivo, tales como la moniliasis (*M. roleri*) y la mazorca negra (*Phytophthora* sp.) utilizando procesamiento de imágenes; ii) cuantificar el impacto del tratamiento con azufre sobre variables agronómicas relacionadas al rendimiento agronómico del cacao; y iii) realizar una evaluación económica de los tratamientos, a fin de determinar la relación beneficio/costo asociada a la aplicación del azufre en condiciones de campo.

¹ Montes-Mosquera, M. A. (2016). *Efectos del fósforo y azufre sobre el rendimiento de mazorcas en una plantación de cacao (Theobroma cacao L.) CCN-51, en la zona de Babahoyo*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo. Babahoyo, Ecuador: Universidad Técnica de Babahoyo.

² Álvarez-Romero, J. A. (2021). *Alternativa de control de la oidiosis en arándano (Vaccinium corymbosum) orgánico en Piura*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento. La presente investigación se llevó a cabo en el Campus "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, localizado en el kilómetro 7 de la vía Quevedo - El Empalme, en la provincia de Los Ríos, Ecuador. El sitio experimental se encuentra a una altitud de 75 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas geográficas de 79° 27" O y 01° 06" S. Con el objetivo de asegurar una alta presión de enfermedades causadas por *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp., el ensayo se desarrolló durante la estación lluviosa, comprendida entre los meses de noviembre y marzo del año 2024. Según datos climatológicos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), durante este periodo se registró una precipitación promedio mensual de 130.4 mm, condición que favoreció el desarrollo de enfermedades en el cultivo (INAMHI, 2024).

Diseño experimental. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, conformado por cuatro tratamientos y tres repeticiones, lo que resultó en un total de 12 unidades experimentales. Cada unidad estuvo compuesta por seis plantas de cacao distribuidas en parcelas rectangulares de 38.20 m² (5 m × 8 m), con una distancia de siembra de 3 metros entre plantas. El área total del ensayo fue de 480 m². Las plantas utilizadas tienen una edad de 12 años, lo que asegura una etapa de producción plena y una alta probabilidad de incidencia de enfermedades como *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp., favorecida por el monocultivo prolongado en el sitio experimental.

Análisis edafoclimático y nutricional. Se realizaron muestreos de suelo y tejido foliar en el área experimental con el propósito de evaluar el estado nutricional del cultivo, incluyendo el contenido de azufre. Los análisis fueron efectuados en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Estación Experimental Pichilingue. Los resultados obtenidos sirvieron como base para establecer un plan nutricional específico durante el desarrollo del ensayo. Previo al establecimiento del experimento, se llevó a cabo un análisis de suelo detallado para identificar las necesidades nutricionales del cultivo de cacao (Cuadro 1). Para la determinación del pH, se utilizó una relación suelo:agua de 1:2.5 mediante el método del conductímetro. El análisis de la materia orgánica se realizó a través de la titulación de Walkley-Black. En cuanto a la extracción de nutrientes, se aplicó el método de Olsen Modificado para determinar los niveles de fósforo, potasio, calcio, magnesio, cobre, hierro, manganeso y zinc. Para elementos específicos como el azufre y el boro, se utilizó el extractante Fosfato de Calcio Monobásico. Finalmente, la cuantificación de elementos como potasio, calcio, magnesio, cobre, hierro, manganeso y zinc se llevó a cabo mediante absorción atómica, mientras que el nitrógeno y fósforo se analizaron por colorimetría y el azufre por turbidimetría. Las dosis de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) fueron calculadas mediante el método de curva de extracción de nutrientes, lo que permitió ajustar la fertilización a las condiciones edáficas del sitio. Para corregir posibles deficiencias, se utilizaron fuentes convencionales: urea (46-0-0) como fuente de nitrógeno, fosfato diamónico (18-46-0) para fósforo y muriato de potasio (0-0-60) como fuente de potasio.

Cuadro 1. Análisis de suelo del área de estudio del presente ensayo.
Table 1. Soil analysis of the study area of this trial.

Elemento / Parámetro	Valor	Interpretación	Unidad
pH	5.6	Medianamente ácido	-
Materia orgánica	3.8	Medio	-
Nitrógeno (NH ₄)	6	Medio	mg kg ⁻¹
Fósforo (P)	29	Medio	mg kg ⁻¹
Potasio (K)	1.9	Medio	meq 100ml ⁻¹
Calcio (Ca)	15	Medio	meq 100ml ⁻¹
Magnesio (Mg)	5.9	Medio	meq 100ml ⁻¹
Azufre (S)	54	Alto	mg kg ⁻¹
Zinc (Zn)	0.61	Alto	mg kg ⁻¹
Cobre (Cu)	11.6	Alto	mg kg ⁻¹
Hierro (Fe)	189	Alto	mg kg ⁻¹
Manganeso (Mn)	15.0	Medio	mg kg ⁻¹
Boro (B)	0.28	Bajo	mg kg ⁻¹

Tratamientos. Se evaluaron tres dosis de azufre basadas en los rangos propuestos por Singh *et al.* (2013) en estudios de campo, junto con un tratamiento testigo correspondiente a la fertilización convencional sin aplicación de azufre, equivalente a 438-48-633 kg ha⁻¹ de N-P-K (Suárez-Capello 1994). Los tratamientos establecidos fueron: T1: testigo absoluto (sin aplicación de azufre), T2: 60 kg ha⁻¹ de S, T3: 90 kg ha⁻¹ de S y T4: 120 kg ha⁻¹ de S. La fuente utilizada para la aplicación de azufre fue sulfato de amonio, con una composición de 21% de N y 24% de S. La aplicación fue edáfica, fraccionada en dos momentos: 50% al primer mes del inicio del ensayo y 50% al segundo mes, distribuyéndose en forma de corona a 45 cm del tallo de cada planta. Para garantizar precisión en la dosificación, se utilizó una balanza gramera.

Manejo del experimento. Debido a que ambas enfermedades son endémicas de la zona del estudio, la presión de la enfermedad fue natural. Sin embargo, las enfermedades fueron evaluadas durante 4 semanas previo a la fertilización para determinar posibles diferencias. Antes del establecimiento del experimento, se llevaron a cabo labores de limpieza fitosanitaria mediante la remoción de mazorcas enfermas presentes tanto en el suelo como en las plantas. Se realizó una poda fitosanitaria para eliminar tejidos afectados y se aplicaron productos fitosanitarios específicos: el fungicida Ridomil Gold a una dosis de 500 g por cada 200 L de agua, y el insecticida Benfurool a razón de 250 mL por cada 200 L, con el objetivo de controlar poblaciones del chinche (*Monalonion dissimulatum*). El manejo de malezas se efectuó mediante desbroce mecánico utilizando moto guadaña, complementado con la aplicación de glifosato a una dosis de 1 L por cada 200 L de agua. Durante el desarrollo del ensayo, se implementaron podas sanitarias quincenales para eliminar mazorcas infectadas por moniliasis y mazorca negra, asegurando así la sanidad del cultivo. Asimismo, se realizaron desmalezamientos bimensuales en todas las unidades experimentales. Para facilitar la identificación y organización del ensayo, las parcelas fueron delimitadas y marcadas con cintas amarillas. Adicionalmente, se efectuó la toma de variables de producción durante un mes previo a la aplicación de fertilizantes, con el fin de descartar aquellas parcelas que presentaran rendimientos atípicos o inconsistencias que pudieran afectar la calidad de los datos experimentales.

Confirmación de enfermedades de mazorcas infectadas. Con el propósito de confirmar la presencia de las enfermedades objeto de estudio en mazorcas infectadas, se implementaron dos métodos de aislamiento orientados a la observación de cuerpos fructíferos o esporas. Para el aislamiento de *Moniliophthora roreri*, se aplicaron la desinfección superficial de las mazorcas mediante inmersión en alcohol al 40% durante un minuto, seguida de hipoclorito de sodio al 1% por otro minuto, y posterior flameado. A continuación, se extrajeron fragmentos del tejido infectado y se sembraron en medio Papa-Dextrosa-Agar (PDA), incubados a 28 °C (Carrera-Sánchez, Paredes y Leiva-Mora, 2014). En el caso de *Phytophthora* spp., se recolectaron mazorcas con síntomas típicos de mazorca negra, cuyos fragmentos fueron sembrados en medio arveja-sucrosa-agar (AA) suplementado con antibióticos (ampicilina, rifampicina y penicilina). Las muestras de suelo se procesaron mediante el método de trampeo con tejido vegetal descrito por Erwin y Ribeiro (1996). Todos los cultivos fueron incubados a 24 ± 1 °C bajo luz continua durante siete días, y los aislados obtenidos fueron visualizados al microscopio confirmando la presencia de las enfermedades evaluadas.

Variables evaluadas. Para evaluar la validez del procesamiento de imágenes como herramienta complementaria en la estimación de enfermedades del cacao, se realizó un análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el software Leaf Doctor (Pethybridge y Nelson, 2015) y las escalas visuales convencionales utilizadas para la evaluación de moniliasis (Arteaga-Luna y Espinoza-Castillo, 2010³) y mazorca negra causada por *Phytophthora* sp. (Díaz-Valderrama, Leiva-Espinoza y Aime, 2020). Esta comparación permitió contrastar la precisión del método digital frente a la estimación visual tradicional. Para evaluar comparaciones específicas entre los niveles de azufre, se definieron contrastes ortogonales independientes. El primer contraste (C1) comparó el tratamiento testigo (0 kg ha⁻¹ de S) frente al promedio de las tres dosis evaluadas (60, 90 y 120 kg ha⁻¹). El segundo contraste (C2) contrastó las dosis bajas y medias (60 y 90 kg ha⁻¹) frente a la dosis alta (120 kg ha⁻¹). El tercer contraste (C3) evaluó la tendencia lineal asociada al incremento de la dosis de azufre. Los contrastes se incorporaron al modelo lineal general ajustado para cada variable de respuesta. La significancia estadística se determinó mediante pruebas t asociadas a cada contraste, utilizando el software Infostat versión 1.0 (Di Rienzo *et al.*, 2010). Las variables registradas estuvieron relacionadas con la productividad y sanidad del cultivo, y se recolectaron en 16 tomas de datos realizadas a intervalos quincenales durante cuatro meses. Estas incluyeron: número de cherelles (conteo inicial y seguimiento posaplicación), número y porcentaje de mazorcas sanas (proporción respecto al total por planta), porcentaje de cherelles sanos (sobre el total por unidad experimental), índice de semilla (peso promedio de 100 semillas secas extraídas de 20 mazorcas), índice de mazorca (número de mazorcas necesarias para producir 1 kg de grano seco), peso de almendras en baba (peso de almendras frescas provenientes de mazorcas sanas), e incidencia de moniliasis y mazorca negra (porcentaje de frutos afectados), evaluadas tanto visualmente como mediante el software Leaf Doctor (Pethybridge y Nelson, 2015).

³ Arteaga-Luna, S. P., & Espinoza-Castillo, D. D. (2019). Eficacia de dos productos a base de *Trichoderma*, en tres dosis de aplicación para el control de la mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*) y moniliasis (*Moniliophthora roreri*), en el cantón Francisco de Orellana, provincia de Orellana. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Análisis económico. para evaluar la viabilidad económica de los tratamientos aplicados en el ensayo, se realizó un análisis de relación beneficio/costo (RBC). Este análisis consistió en comparar los ingresos generados por cada tratamiento con los costos totales incurridos durante el ensayo, incluyendo labores culturales, fertilización y adquisición de insumos fitosanitarios. Los ingresos se calcularon a partir del rendimiento en kilogramos por hectárea de almendras secas, considerando una merma del 40% sobre el peso fresco cosechado por parcela, tal como se describe en el protocolo experimental. Los costos fueron desglosados por concepto, incluyendo poda fitosanitaria, aplicación de tratamientos, agroquímicos y demás insumos utilizados durante el periodo de evaluación (Pilaloo, Pérez, Alvarado y Torres, 2021). La fórmula utilizada para calcular la relación beneficio/costo fue: $RBC = \text{Ingresos totales} / \text{Costos totales}$. Este indicador permitió identificar el tratamiento más rentable, considerando tanto la eficacia en el control de la enfermedad como el impacto económico. Se utilizó como precio de referencia la página de precios oficiales del gobierno del Ecuador al momento de realizar el ensayo de \$0.98/lb (SIPA, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio reafirman la importancia del azufre como un elemento clave en el manejo agronómico del cultivo de cacao (*Theobroma cacao*), particularmente en la variedad CCN-51. Su aplicación mostró efectos positivos tanto en la sanidad vegetal como en el rendimiento productivo, en concordancia con estudios previos que respaldan su uso como fertilizante estratégico. Los contrastes ortogonales permitieron identificar patrones específicos en la respuesta del cultivo frente a las dosis de azufre evaluadas. El contraste C1 (testigo vs. promedio de las dosis de S) evidenció un efecto significativo sobre las variables fitosanitarias, indicando que la aplicación de azufre redujo la severidad de las enfermedades evaluadas y aumentó el número de mazorcas sanas en comparación con el tratamiento sin fertilización. Este resultado coincide con la tendencia observada en el tratamiento T2, que mostró la mayor reducción de severidad y un desempeño sanitario superior. El contraste C2 (60-90 kg ha⁻¹ vs. 120 kg ha⁻¹) no mostró diferencias significativas para la mayoría de las variables agronómicas y fitosanitarias, lo que sugiere que incrementar la dosis por encima de 90 kg ha⁻¹ no genera beneficios adicionales en la sanidad del cultivo. Este patrón respalda la eficiencia observada en T2, donde la dosis intermedia se asoció con una mejor relación beneficio/costo. El contraste C3, orientado a detectar una tendencia lineal entre el incremento de la dosis de azufre y la respuesta del cultivo, no mostró un gradiente consistente en las variables de rendimiento. Aunque se observó una mejora sanitaria general con la aplicación de azufre, la respuesta productiva no siguió un patrón lineal, lo que indica que el efecto del nutriente sobre el rendimiento es más complejo y requiere estudios adicionales para establecer recomendaciones definitivas.

La dosis baja de 60 kg ha⁻¹ presentó mejores resultados a comparación de dosis altas del elemento. Algunos estudios coinciden en que las dosis elevadas de azufre pueden generar efectos adversos tanto en el cultivo como en el suelo. En arroz fragante, aplicaciones de hasta 120 kg ha⁻¹ provocan toxicidad por sulfuros, afectando la integridad de la planta y reduciendo el rendimiento y la calidad del grano (Chaiboontha, Chanauksorn, Santasup, Chaiwan y Prom-u-thai, 2025). En papa, el rendimiento máximo se alcanza con 60 kg ha⁻¹, mientras que incrementos a 90 kg ha⁻¹ reducen la productividad, evidenciando un punto de saturación fisiológica (Novoselov e Ivanova, 2020). Asimismo, dosis altas intensifican la oxidación del azufre y la liberación de iones H⁺, generando una acidificación marcada del suelo que puede comprometer el desarrollo radicular (Atar, 2020). El uso de 90 kg ha⁻¹ también produce un balance positivo de azufre excesivo, indicando baja eficiencia de uso y mayores pérdidas por acumulación o lixiviación (Novoselov e Ivanova, 2020). Estos efectos se acentúan bajo precipitaciones irregulares, donde la planta no logra asimilar el exceso de nutrientes, reduciendo la ventaja de dosis altas frente a aplicaciones moderadas como 60 kg ha⁻¹ (Chaiboontha et al., 2025). En conjunto, la evidencia señala que 60 kg ha⁻¹ representa un equilibrio óptimo, mientras que dosis superiores resultan agrónomicamente y económicamente ineficientes y pueden comprometer la salud del sistema suelo-planta (Novoselov e Ivanova, 2020; Chaiboontha et al., 2025). A continuación, se presentan los diferentes objetivos analizados de forma individual.

Evaluación de *Moniliophthora roreri* bajo diferentes dosis de azufre. Los resultados obtenidos en la evaluación de la severidad de *Moniliophthora roreri* mediante correlación entre escalas visuales tradicionales y el software Leaf Doctor (Pethybridge y Nelson, 2015) ($R = 0.92$) evidencian una fuerte relación lineal entre ambos métodos, lo que respalda la confiabilidad del uso de herramientas digitales para la cuantificación de enfermedades (Figura 1). Esta correspondencia se alinea con estudios previos que destacan la precisión de sistemas basados en sensores e imagen digital, como los reportados por Vences-Tachong, Vélez, Gaibor y Herrera (2022) en maíz, donde se observaron correlaciones entre 0.77 y 0.94. La validación de métodos automatizados ha sido ampliamente discutida en la literatura, señalando que tecnologías como Leaf Doctor, basadas en análisis de imágenes en el espectro visible (VIS), permiten una medición más objetiva y reproducible de la severidad, superando las limitaciones inherentes a la estimación visual (Bock et al., 2010; Barbedo, 2013; Mahlein, 2016).

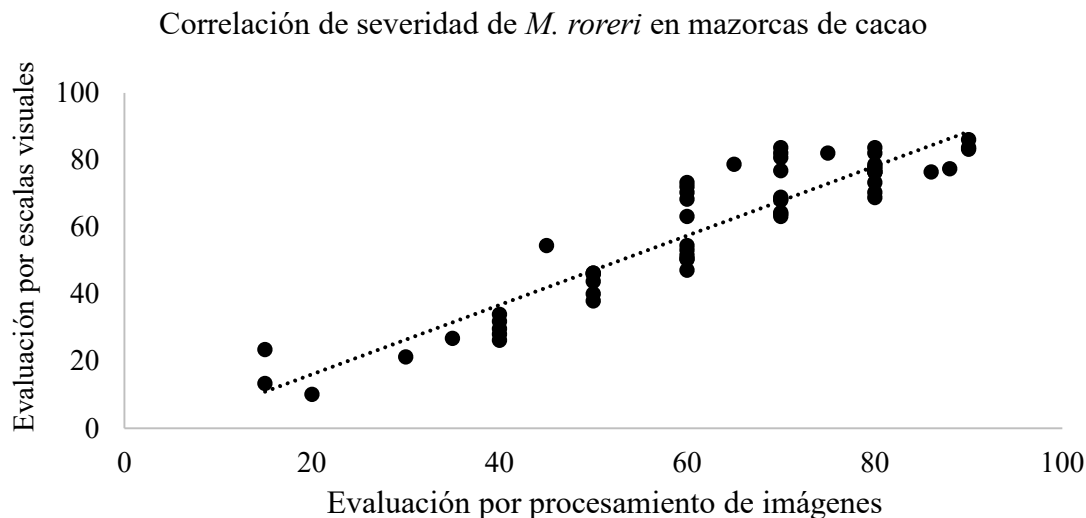


Figura 1. Correlación entre dos métodos de evaluación de severidad de monilia (*Moniliophthora royeri*) en mazorcas de cacao (*Theobroma cacao*). $R^2 = 0.92$. Número de muestras=50.

Figure 1. Correlation between two methods for assessing the severity of frosty pod rot (*Moniliophthora royeri*) in cacao pods (*Theobroma cacao*). $R^2 = 0.92$. Sample size = 50.

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre tratamientos de azufre para el control de monilia en comparación con el control. El control presentó la mayor severidad visual y con el procesamiento de imágenes (Figura 2). El resto de los tratamientos mostraron una menor severidad, pero no fueron significativamente diferentes entre los mismos. Estos resultados coinciden con Dawar *et al.* (2023), quienes destacan que el azufre mejora procesos fisiológicos como la síntesis de proteínas y el crecimiento vegetal, pero su efecto sobre la resistencia a enfermedades puede variar. Rasool, Hassan y Jahangir (2013) observaron que dosis altas de S aumentan el crecimiento y la partición de fotoasimilados, lo que podría influir en la susceptibilidad y aumentar la resistencia a patógenos. Además, la interacción S-N puede alterar el metabolismo defensivo (Larrainzar *et al.*, 2007).

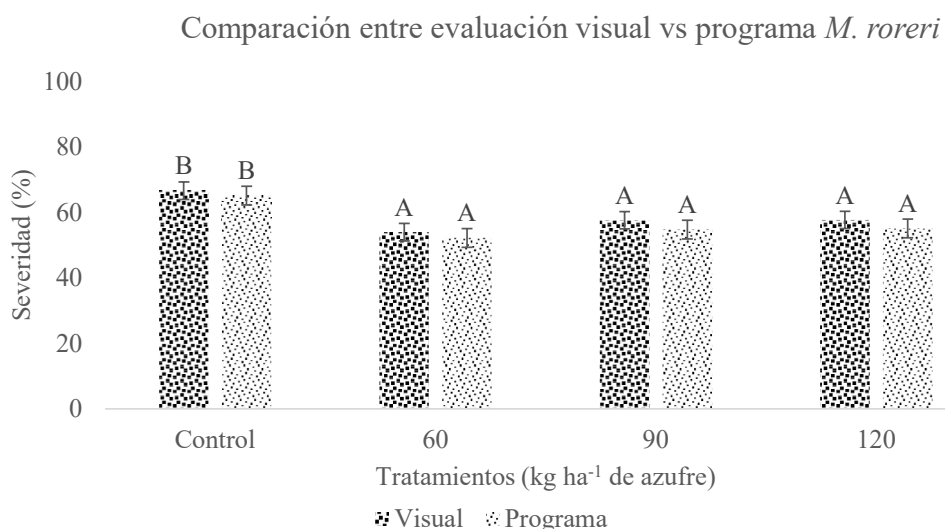


Figura 2. Severidad de monilia (*Moniliophthora royeri*) en mazorcas de cacao (*Theobroma cacao*) evaluadas por escalas visuales y por programa de procesamiento de imágenes. Las barras representan en error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$).

Figure 2. Severity of frosty pod rot (*Moniliophthora royeri*) in cacao pods (*Theobroma cacao*) evaluated using visual rating scales and an image processing program. Bars represent standard errors. Different letters indicate statistically significant differences (Tukey $p < 0.05$).

Evaluación de *Phytophthora* sp. bajo diferentes dosis de azufre. La evaluación de la severidad de *Phytophthora* sp. mediante métodos visuales y digitales mostró una correlación significativa ($R = 0.93$) (Figura 3), lo que confirma la consistencia metodológica entre ambas aproximaciones y respalda el uso de herramientas tecnológicas para mejorar la precisión diagnóstica (Bock *et al.*, 2010; Mahlein, 2016). Se ha documentado que las evaluaciones visuales presentan errores sistemáticos y constantes, especialmente en rangos bajos de severidad, y están sujetas a variabilidad del evaluador (Nutter-Jr, Gleason, Jenco y Christians, 1993; Bock *et al.*, 2010; Chiang *et al.*, 2016), lo que puede comprometer la precisión de los datos. Hernández-Ramos y Sandoval-Islas (2015) han señalado que la ausencia de herramientas complementarias en la evaluación visual incrementa el riesgo de error, reforzando la necesidad de integrar tecnologías diagnósticas en el proceso de estimación. En este contexto, el uso de software como Leaf Doctor (Pethybridge y Nelson, 2015) representa una alternativa eficaz para mejorar la exactitud, reducir el sesgo y fortalecer la toma de decisiones en fitopatología, especialmente en sistemas de producción donde la precisión es crítica para el manejo integrado de enfermedades.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el tratamiento control presentó la mayor severidad del agente patógeno en comparación con los tratamientos que incluyeron fuentes de azufre, sin observar diferencias significativas entre estas últimas (Figura 4). Este comportamiento coincide con lo reportado por Pazmiño-Muñoz, *et al.* (2024), quien documentó efectos biocidas de la zeolita en cultivos de fréjol. La menor severidad observada en los tratamientos con azufre puede atribuirse a la participación de este elemento en la biosíntesis de compuestos de defensa como glucosinolatos, glutatión y cisteína, los cuales desempeñan funciones clave en la respuesta antioxidante y en la detoxificación de metales pesados (Halkier y Gershenzon, 2006; Hasanuzzaman *et al.*, 2017; Romero *et al.*, 2014). Además, el azufre está implicado en la regulación de enzimas antioxidantes y en la expresión de genes relacionados con la tolerancia al estrés, lo que refuerza su papel protector frente a condiciones adversas (Aroca, Gotor, Bassham y Romero, 2020; Anjum *et al.*, 2015). La acción del azufre también se vincula con la producción de señales moleculares como el H_2S , que modulan procesos fisiológicos y de defensa (Li, Min y Zhou, 2016). Estos mecanismos explican la reducción de severidad observada en los tratamientos con azufre, independientemente de la fuente utilizada, lo cual se alinea con estudios previos que destacan su efecto positivo en la mitigación de estreses bióticos y abióticos (Scherer, 2001; Capaldi, Gratão, Reis, Lima y Azevedo, 2015).

Variables productivas y de rendimiento. La aplicación de 60 kg ha^{-1} de azufre resultó en un incremento significativo en el número total de mazorcas, lo que sugiere una mejora en el desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo. Este hallazgo concuerda con estudios previos que destacan el papel del azufre en la síntesis de proteínas y enzimas esenciales para el crecimiento vegetal, así como en la formación de compuestos secundarios que influyen en la calidad y sanidad de los órganos reproductivos (Zenda, Liu, Dong y Duan, 2021; Rasool *et al.*, 2013).

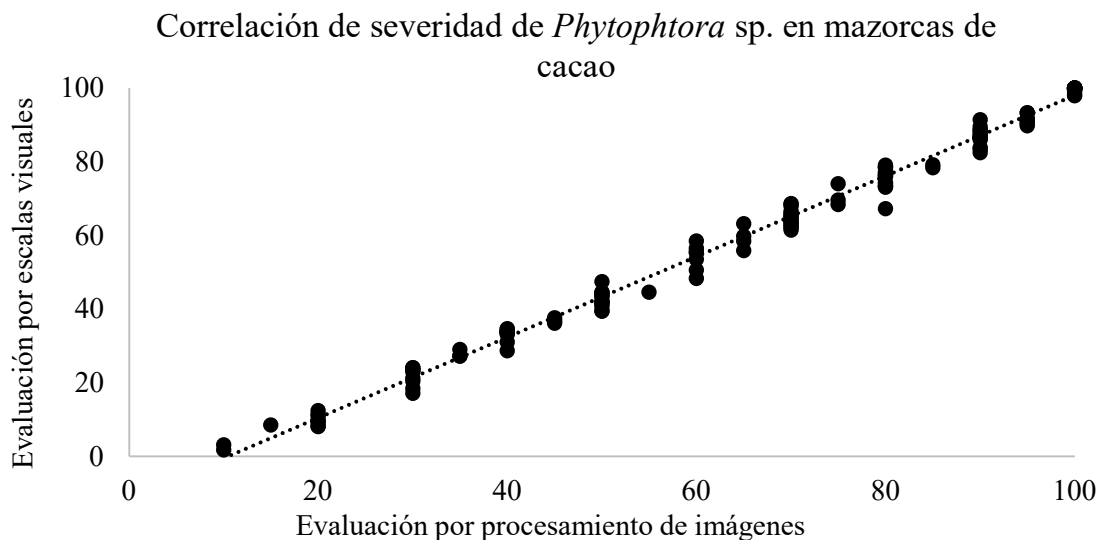


Figura 3. Correlación entre dos métodos de evaluación de severidad de mazorca negra (*Phytophthora* sp.) en mazorcas de cacao (*Theobroma cacao*). $R^2 = 0.93$. Número de muestras=50.

Figure 3. Correlation between two methods for assessing black pod severity (*Phytophthora* sp.) in cacao pods (*Theobroma cacao*). $R^2 = 0.93$. Sample size = 50.

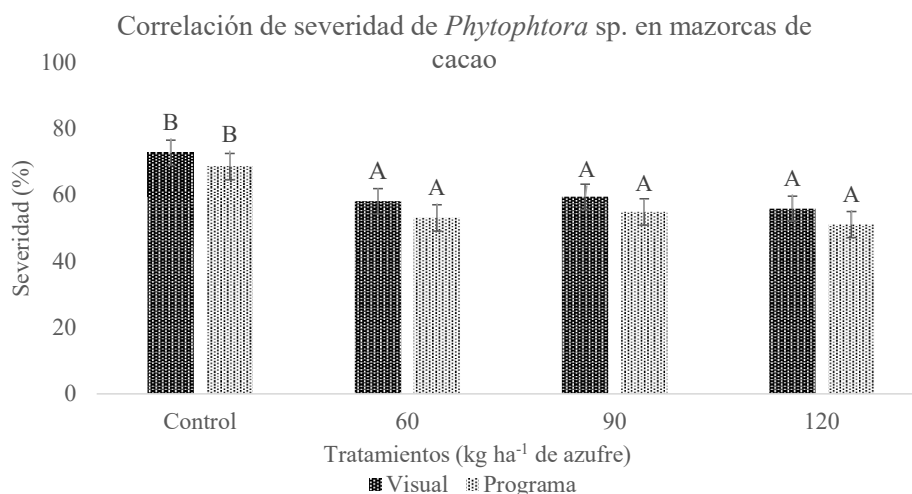


Figura 4. Severidad de mazorca negra (*Phytophthora* sp.) en cacao (*Theobroma cacao*) evaluadas por escalas visuales y por programa de procesamiento de imágenes. (Tukey $p < 0.05$).
Figure 4. Severity of black pod disease (*Phytophthora* sp.) in cacao (*Theobroma cacao*) was assessed using visual rating scales and an image processing software. (Tukey $p < 0.05$).

Aunque no se observaron diferencias significativas en variables como el número de mazorcas cosechadas, mazorcas de descarte, mazorcas enfermas, ni en los pesos del almendro y de las semillas en baba y seco, sí se evidenciaron diferencias en el número de mazorcas sanas, chereles sanos y chereles enfermos entre los tratamientos con azufre y el control. Esto podría atribuirse a la función del azufre en la mejora de la tolerancia a estrés abiótico y en la activación de mecanismos de defensa, como la síntesis de glutatión y fitoalexinas, que contribuyen a la sanidad de los tejidos reproductivos (Anjum *et al.*, 2012; Hell, Khan y Wirtz, 2010; Zhao, Tausz y De Kok, 2008). Además, se ha documentado que el azufre favorece la eficiencia en el uso del nitrógeno, lo que puede traducirse en una mejor formación de estructuras reproductivas como las mazorcas (Jamal, Moon y Abdin, 2010; Salvagiotti y Miralles, 2008). Estos resultados son consistentes con lo reportado por López-Ávalos *et al.* (2025), quien concluye que la dosis de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ favorece la productividad en cultivos como el maíz (Cuadro 2).

Análisis económico. El tratamiento con 60 kg ha⁻¹ evidenció ser el más eficiente en términos agronómicos y económicos, alcanzando un rendimiento de 1444.2 libras. ha⁻¹, ingreso bruto de \$1415.27, una relación beneficio/costo (B/C) de 1.96 y una rentabilidad del 95.88%, superando significativamente al control, que apenas logró 1153.6 libras. ha⁻¹ y una rentabilidad del 58.99% (Cuadro 3). Estos resultados coinciden con lo reportado por

Cuadro 2. Análisis de las variables agronómicas en el cacao (*Theobroma cacao*) bajo la aplicación de diferentes dosis de azufre.
Table 2. Analysis of agronomic variables in cacao (*Theobroma cacao*) under the application of different sulfur doses.

Variabes evaluadas	T1 (Control)	T2 (60 kg ha ⁻¹)	T3 (90 kg ha ⁻¹)	T4 (120 kg ha ⁻¹)
Mazorcas totales (#)	22.29 b	45.17 a	27.85 b	21.21 b
Mazorcas cosechadas (#)	3.00 a	3.39 a	3.30 a	3.21 a
Mazorcas descarte (#)	1.33 a	1.86 a	1.40 a	1.00 a
Mazorcas sanas (#)	19.17 b	22.08 a	24.79 a	22.19 a
Mazorcas enfermas (#)	2.56 a	2.56 a	2.68 a	2.08 a
Chereles sanos (#)	77.69 b	91.21 a	94.38 a	94.40 a
Chereles enfermos (#)	41.61 b	36.90 a	36.26 a	37.78 a
Peso de almendro en baba (g)	581.67 a	530.83 a	550.29 a	564.8 a
Peso de almendro seco (g)	238.71 a	266.61 a	274.90 a	290.64 a
Peso de 100 semillas en baba (g)	296.71 a	329.22 a	368.80 a	309.71 a
Peso 100 semillas seco (g)	158.24 a	171.33 a	188.30 a	163.43 a

Cuadro 3. Análisis beneficio/costo (B/C) de la aplicación de azufre en cacao (*Theobroma cacao*). Precio de venta oficial al momento de realizar el ensayo (2024) fue de \$0.98/lb.

Table 3. Benefit/cost (B/C) analysis of sulfur application in cacao (*Theobroma cacao*). The official selling price at the time of the trial (2024) was \$0.98/lb.

Tratamiento	Rendimiento	Ingresos	Egresos	B/C	Rentabilidad (%)
(kg. ha ⁻¹ azufre)					
T1: Control	1153.6	1130.51	711.06	1.59	58.99
T2: 60	1444.2	1415.27	722.51	1.96	95.88
T3: 90	1337.7	1310.94	718.51	1.82	82.45
T4: 120	1295.8	1269.90	717.09	1.77	77.09

Vinces-Tachong *et al.* (2022) quienes demostraron que el silicio mejora la rentabilidad en cacao, y con Pazmiño-Muñoz, *et al.* (2024), quien evidenció que la zeolita incrementa el rendimiento y la rentabilidad neta en cacao y fréjol respectivamente. Además, se alinean con los hallazgos de Alcívar-Córdova *et al.* (2021), quienes destacan que el cacao ecuatoriano, especialmente el fino de aroma presenta bajos niveles de productividad a pesar de su alta demanda internacional, lo que subraya la necesidad de estrategias agronómicas que optimicen el rendimiento y la rentabilidad. La investigación también respalda que mejoras en la productividad, como las observadas en el tratamiento de 60 kg ha⁻¹, pueden contribuir significativamente al ingreso bruto y al aporte al PIB nacional, como lo evidencian las exportaciones ecuatorianas de cacao que alcanzaron \$720 millones en 2019 (Banco Central del Ecuador, 2019). Asimismo, el uso de tecnologías agronómicas que aumenten la eficiencia productiva es clave para fortalecer la cadena de valor del cacao, especialmente en contextos de volatilidad de precios internacionales (Alvarado, Ullauri y Benítez, 2019; León-Villamar, Calderón-Salazar y Mayorga-Quinteros, 2016). En este sentido, el incremento en la rentabilidad observado en este estudio representa una alternativa viable para mejorar el sustento de más de 240 000 familias vinculadas al sector cacaotero (ANECACAO, 2019). La importancia del azufre no solo radica en su acción biocida, sino también en su papel en procesos fisiológicos esenciales como la síntesis de proteínas, formación de clorofila y mejora del vigor general, lo que contribuye a una mayor resistencia al estrés y a una floración más eficiente (Cooper y Williams, 2004). Estos beneficios justifican su inclusión en programas de fertilización balanceada, especialmente en suelos deficientes en este nutriente.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la aplicación de azufre en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), variedad CCN-51, puede contribuir significativamente a mejorar la sanidad vegetal, especialmente mediante la reducción de enfermedades fúngicas como *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* sp. La dosis de 60 kg ha⁻¹ (T2) destacó por disminuir la severidad de ambas enfermedades, incrementar el número de mazorcas sanas y presentar una relación beneficio/costo favorable (1.13), lo que respalda su viabilidad como estrategia agronómica sostenible en sistemas productivos ecuatorianos. Los resultados sugieren que el azufre actúa como biorremediador sin comprometer la productividad, ofreciendo una alternativa prometedora para el manejo nutricional en suelos con limitaciones fitosanitarias. Se recomienda continuar con investigaciones complementarias que permitan afinar las recomendaciones técnicas y validar su impacto en diferentes condiciones agroecológicas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

El artículo tributa a uno de los resultados comprometidos del proyecto FOCYCIT 10ma Convocatoria PFOC10-42-2024 de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo del cual recibió financiación parcial.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: F.E.H.E.; Metodología: F.E.H.E.; Validación: C.A.M.P.; Análisis formal: A.J.M.C.; Investigación: A.J.M.C.; Recursos: A.J.M.C.; Curación de datos: F.E.H.E.; Escritura - preparación del borrador original: A.J.M.C.; Escritura - revisión y edición: F.E.H.E., C.A.M.P. y C.P.H.F.; Supervisión: F.E.H.E.; Adquisición de fondos: F.E.H.E.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al tribunal encargado de la revisión y aprobación del documento proyecto de titulación de A.J.M.C. durante sus estudios universitarios como Ingeniero Agrónomo.

LITERATURA CITADA

- Alcívar-Córdova, K. S., Quezada-Campoverde, J. M., Barrezueta-Unda, S., Garzón-Montealegre, V. J., & Carvajal-Romero, H. (2021). Análisis económico de la exportación del cacao en el Ecuador durante el periodo 2014 - 2019. *Polo del Conocimiento*, 6(3), 2430-2444.
- Alvarado, M., Ullauri, N., & Benítez, F. (2020). Impacto de exportaciones primarias en el crecimiento económico del Ecuador: análisis econométrico desde Cobb Douglas, período 2000-2017. *Revista de la Universidad Internacional del Ecuador*, 5(1), 206-217. <https://doi.org/10.33890/innova.v5.n1.2020.1140>
- Álvarez, J. C., Martínez, S. C., & Coy, J. (2014). Estado de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 388-399.
- ANECACAO (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao). (2019). Estadísticas actuales del sector cacaotero. Guayaquil, Ecuador: Asociación Nacional de Exportadores de Cacao.
- ANECACAO (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao). (2021). Informe anual de exportaciones de cacao. Guayaquil, Ecuador: Asociación Nacional de Exportadores de Cacao.
- Anjum, N. A., Gill, R., Kaushik, M., Hasanuzzaman, M., Pereira, E., Ahmad, I., & Gill, S. S. (2015). ATP-sulfurylase, sulfur-compounds, and plant stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 6, 210. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00210>
- Anjum, N. A., Gill, S. S., Umar, S., Ahmad, I., Duarte, A. C., & Pereira, E. (2012). Improving growth and productivity of oleiferous Brassicas under changing environment: Significance of nitrogen and sulphur nutrition, and underlying mechanisms. *The Scientific World Journal*, 2012, 657808. <https://doi.org/10.1100/2012/657808>
- Aroca, Á., Gotor, C., Bassham, D. C., & Romero, L. C. (2020). Hydrogen sulfide: From a toxic molecule to a key molecule of cell life. *Antioxidants*, 9(7), 621. <https://doi.org/10.3390/antiox9070621>
- Atar, B. (2020). Effects of extra sulfur fertilization on soil pH and grain mineral concentration in wheat. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 4(1), 101-106. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2020.1.11>
- Banco Central del Ecuador (BCE). (2021). La economía ecuatoriana creció 4,5% en el tercer trimestre, al comparar con el segundo trimestre de 2020. Quito, Ecuador: Banco Central del Ecuador. Consultado el 20 de mayo, 2025, desde <https://www.bce.fin.ec/la-economia-ecuatoriana-crecio-4-5-en-el-tercer-trimestre-al-comparar-con-el-segundo-trimestre-de-2020/>
- Barbedo, J. G. A. (2013). Digital image processing techniques for detecting, quantifying and classifying plant diseases. *SpringerPlus*, 2(660), 1-12. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-660>
- Bock, C. H., Poole, G. H., Parker, P. E., & Gottwald, T. R. (2010). Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(2), 59-107.
- Bukari, Y., Avicor, S. W., Ainooson, M. K., Asare, E. K., Awudzi, G. K., & Amoako-Attah, I. (2025). Antifungal Potential of Sweet Orange Essential Oil on Pathogens of Two Important Cocoa Diseases in Ghana. *International Journal of Agronomy*, 2025(1), 7439318. <https://doi.org/10.1155/iao/7439318>
- Capaldi, F. R., Gratão, P. L., Reis, A. R., Lima, L. W., & Azevedo, R. A. (2015). Sulfur metabolism and stress defense responses in plants. *Tropical Plant Biology*, 8, 60-73. <https://doi.org/10.1007/s12042-015-9152-1>
- Carrera-Sánchez, K., Paredes, L. M., & Leiva-Mora, M. (2014). Protocolo para el aislamiento de *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al. en frutos de cacao cv.Nacional de la Amazonía ecuatoriana. *Biotecnología Vegetal*, 14(3), 1-4.
- Chaiboontha, S., Chanauksorn, C., Santasup, C., Chaiwan, F., & Prom-u-thai, C. (2025). Optimizing sulfur fertilization for yield and aroma enhancement in fragrant rice under varying soil sulfur conditions. *Agronomy*, 15(7), 1569. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071569>
- Chiang, K. S., Liu, H. P., & Bock, C. H. (2016). Effects of rater bias and assessment method on the accuracy of visual disease severity estimates. *Plant Pathology*, 65(4), 667-677. <https://doi.org/10.1111/ppa.12435>
- Cooper, R. M., & Williams, J. S. (2004). Elemental sulphur as an induced antifungal substance in plant defence. *Journal of Experimental Botany*, 55(404), 1947-1953. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh179>

- Córdova-Durán, E. G. (2025). Cacao fino de aroma: Comercio interno en el Ecuador. *Arandu UTIC*, 11(2), 3365–3380. <https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.506>
- Cortes, C. P., Torrejano, V. M., Ceron, A., & Díaz, G. C. (2025). Evaluación de cepas de *Trichoderma* spp. para el control de *Phytophthora* spp. En *Theobroma cacao* L. en el sur de Colombia. *RIAA*, 16(1), 1-14. <https://doi.org/10.22490/21456453.7700>
- Crespo del Campo, E., & Crespo-Andía, F. (1997). *Cultivo y beneficio del cacao CCN51*. Quito, Ecuador: Editorial El Conejo.
- Dawar, R., Karan, S., Bhardwaj, S., Meena, D. K., Padhan, S. R., Reddy, K. S., & Bana, R. S. (2023). Role of sulphur fertilization in legume crops: A comprehensive review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(21), 718–727. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i214033>
- Del Ponte, E. M., Pethybridge, S. J., Bock, C. H., Michereff, S. J., Machado, F. J., & Spolti, P. (2017). Standard area diagrams for aiding severity estimation: scientometrics, pathosystems, and methodological trends in the last 25 years. *Phytopathology*, 107(10), 1161-1174. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-17-0069-FI>
- Di Rienzo, J. A., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Casanoves, F., Cuadrado, M., & Robledo, C. W. (2011). *Infostat: software para análisis estadístico (versión 2011)*. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat.
- Díaz-Valderrama, J. R., Leiva-Espinoza, S. T., & Aime, M. C. (2020). The history of cacao and its diseases in the Americas. *Phytopathology*, 110(10), 1604-1619. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0178-RVW>
- Doungous, O., Minyaka, E., Longue, E. A. M., & Nkengafac, N. J. (2018). Potentials of cocoa pod husk-based compost on Phytophthora pod rot disease suppression, soil fertility, and Theobroma cacao L. growth. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 25327–25335. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2591-0>
- Erwin, D. C., & Ribeiro, O. K. (1996). *Phytophthora diseases worldwide*. St. Paul, MN, USA: APS Press.
- Evans, H. C. (2007). Cacao Diseases—The Trilogy Revisited. *Phytopathology*, 97(12), 1640–1643. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-12-1640>
- García-Briones, A. R., Pico-Pico, B. F., & Jaimez, R. E. (2021). La cadena de producción del cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. *Revista Digital Novasinergia*, 4(2), 152-172. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.10>
- González, H., Sadeghian, S., & Mejía, B. (2005). *El azufre en los suelos de la zona cafetera colombiana. Avances Técnicos Cenicafé No. 332*. Manizales, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café.
- Gutiérrez, O. A., Puig, A. S., Phillips-Mora, W., Bailey, B. A., Ali, S. S., Mockaitis, K., ... & Motamayor, J. C. (2021). SNP markers associated with resistance to frosty pod and black pod rot diseases in an F1 population of *Theobroma cacao* L. *Tree Genetics & Genomes*, 17, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11295-021-01507-w>
- Halkier, B. A., & Gershenzon, J. (2006). Biology and biochemistry of glucosinolates. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 303-333. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105228>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., Khan, M. I. R., Fujita, M., & Ahmad, P. (2017). Glutathione in plants: biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23, 249-268. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0422-2>
- Hell, R., Khan, M. S., & Wirtz, M. (2010). Cellular biology of sulfur and its functions in plants. In R. Hell, R. R. Mendel (Eds.), *Cell Biology of Metals and Nutrients* (pp. 243–279). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10613-2_11
- Hernández-Ramos, L., & Sandoval-Islas, J. S. (2015). Escala diagramática de severidad para el complejo mancha de asfalto del maíz. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(1), 95-103.
- ICCO (International Cocoa Organization). (2019). *Annual report on global cacao production losses*. Consultado el 15 de febrero, 2025, desde <https://www.icco.org>
- ICCO (International Cocoa Organization). (2021). *Annual Report 2020/2021*. Consultado el 15 de febrero, 2025, desde <https://www.icco.org>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2024). *Boletín No. 07 - 2024*. Consultado el 15 de febrero, 2025, desde <https://servicios.inamhi.gob.ec/clima1/>
- Jamal, A., Moon, Y., & Abdin, M. Z. (2010). Sulphur—a general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, 4(7), 523-529.
- Larrainzar, E., Wienkoop, S., Weckwerth, W., Ladrera, R., Arrese-Igor, C., & González, E. M. (2007). *Medicago truncatula* root nodule proteome analysis reveals differential plant and bacteroid responses to drought stress. *Plant Physiology*, 144(3), 1495-1507. <https://doi.org/10.1104/pp.107.101618>
- León-Villamar, F., Calderón-Salazar, J., & Mayorga-Quinteros, E. (2016). Estrategias para el cultivo, comercialización y exportación del cacao fino de aroma en Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 9(18), 45-55.
- Li, Z.-G., Min, X., & Zhou, Z.-H. (2016). Hydrogen sulfide: A signal molecule in plant cross-adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1621. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01621>
- López-Ávalos, D. F., Lugo-Pereira, W. D., Salinas-Bonhomme, O. L., Morel-López, E., Da Silva, M. O., Mongelos-Barrios, C. A., & Sánchez-Jara, R. (2025). Efectividad agronómica de fuentes de fertilizantes fosfatadas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 9(26), 465-482. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.359>
- Madden, L. V., Hughes, G., & Bosch, F. V. D. (2007). *The study of plant disease epidemics*. St. Paul, MN, USA: APS Press.
- Mahlein, A. K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241-251.
- Mahlein, A. K., Steiner, U., Dehne, H. W., & Oerke, E. C. (2010). Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. *Precision Agriculture*, 11, 413-431. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9180-7>
- Meinhardt, L. W., Rincones, J., Bailey, B. A., Aime, M. C., Griffith, G. W., Zhang, D., & Pereira, G. A. G. (2008). *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of witches' broom disease of cacao: What's new from this old foe? *Molecular Plant Pathology*, 9(5), 577-588. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00496.x>
- Mondego, J. M., Carazzolle, M. F., Costa, G. G., Formighieri, E. F., Parizzi, L. P., Rincones, J., ... & Pereira, G. A. (2008). A genome survey of *Moniliophthora perniciosa* gives new insights into Witches' Broom Disease of cacao. *BMC Genomics*, 9, 548. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-9-548>
- Muller, E. (2016). Cacao Swollen Shoot Virus (CSSV): History, biology, and genome. En B. Bailey & L. Meinhardt (Eds.). *Cacao diseases* (pp. 241–270). The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_10
- Muller, E., & Sackey, S. (2005). Molecular variability analysis of five new complete cacao swollen shoot virus genomic sequences. *Archives of Virology*, 150(1), 53-66. <https://doi.org/10.1007/s00705-004-0394-8>
- Mutka, A. M., & Bart, R. S. (2015). Image-based phenotyping of plant disease symptoms. *Frontiers in Plant Science*, 5, 734. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00734>
- Novoselov, S. I., & Ivanova, A. V. (2020). Sulfur-containing fertilizers influence on sulfur balance at potato cultivation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 421(3), 032031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/3/032031>
- Nutter, F. W., Esker, P. D., & Netto, R. A. C. (2006). Disease assessment concepts and the advancements made in improving the accuracy and precision of plant disease data. *European Journal of Plant Pathology*, 115, 95-103. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-1230-z>

- Nutter-Jr., F. W., Gleason, M. L., Jenco, J. H., & Christians, N. C. (1993). Assessing the accuracy, intra-rater repeatability, and inter-rater reliability of disease assessment systems. *Phytopathology*, 83(8), 806–812. <https://doi.org/10.1094/Phyto-83-806>
- Parada-Gutiérrez, O., & Veloz-Cordero, R. L. (2021). Análisis socioeconómico de productores de cacao, localidad Guabito, provincia Los Ríos, Ecuador. *Ciencias Holguín*, 27(1), 1-17.
- Pazmiño-Muñoz, E. M., Sánchez-Iznaga, Á. L., Realpe-Iduarte, J. A., Baldeon-Prieto, G. J., Romero-Troya, Y. A., & Herrera-Egüez, F. E. (2024). Use of clinoptilolite aluminosilicate (ZeoterA) in the cultivation of beans (*Phaseolus vulgaris*) controlling anthracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) under different doses of phosphorus. *INQUIDE*, 5(02), 16-21. <https://doi.org/10.53591/iqd.v5i02.1062>
- Perrine-Walker, F. (2020). *Phytophthora palmivora*-cocoa interaction. *Journal of Fungi*, 6(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/jof6030167>
- Pethybridge, S. J., & Nelson, S. C. (2015). Leaf Doctor: A new portable application for quantifying plant disease severity. *Plant Disease*, 99(10), 1310-1316. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- Pilalao, W., Pérez, D., Alvarado, A., & Torres, S. (2021). Manejo agroecológico de la Moniliasis en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) mediante la utilización de biofungicidas y podas fitosanitarias en el cantón La Troncal. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(15), 70-85. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.129>
- Ploetz, R. C. (2016). The impact of diseases on cacao production: A global overview. In B. A. Bailey & L. W. Meinhardt (Eds.). *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters* (pp. 33-59). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_2
- Rasool, F. U., Hassan, B., & Jahangir, I. A. (2013). Growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) as influenced by nitrogen, sulphur and farmyard manure under temperate conditions. *SAARC Journal of Agriculture*, 11(1), 149-153. <https://doi.org/10.3329/sja.v11i1.18391>
- Rojo, F. G., Reynoso, M. M., Ferez, M., Chulze, S. N., & Torres, A. M. (2007). Biocontrol of cacao pathogens using *Trichoderma asperellum*. *Crop Protection*, 26(4), 564-570. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.05.006>
- Romero, L. C., Aroca, Á., Laureano-Marín, A. M., Moreno, I., García, I., & Gotor, C. (2014). Cysteine metabolism in plants: the role of O-acetylserine(thiol)lyase. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00005>
- Salvagiotti, F., & Miralles, D. J. (2008). Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*, 28(3), 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.08.002>
- Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production. *European Journal of Agronomy*, 14(2), 81-111. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00082-4)
- Simko, I., Jimenez-Berni, J. A., & Sirault, X. R. (2017). Phenomic approaches and tools for phytopathologists. *Phytopathology*, 107(1), 6-17.
- Singh, J., Singh, M., Jain, A., Bhardwaj, S., Singh, A., Singh, D. K., ... & Dubey, S. K. (2013). An introduction of plant nutrients and foliar fertilization: A review. En *Precision farming: A new approach* (pp. 252-320). New Delhi, India: Daya Publishing House.
- SIPA (Sistema de Información Pública Agropecuaria). (2024). Operativos de rendimientos objetivos: Rendimiento de cacao. Quito, Ecuador: Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. Consultado el 20 de mayo, 2026, desde <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/informe-de-rendimientos-objetivos/rendimiento-de-cacao>
- Smith, L. (2005). Host plant specificity and potential impact of *Aceria salsolae* (Acari: Eriophyidae), an agent proposed for biological control of Russian thistle (*Salsola tragus*). *Biological Control*, 34(1), 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.03.003>
- Sornoza-Vélez, L., Valencia-Carreño, L., Corozo-Quiñónez, L., Sánchez-Mora, F., Salas-Macías, C., & Peña-Monserrate, G. (2022). Recursos genéticos de cacao tipo nacional en Ecuador: una revisión sistemática. *Revista Ciencia Y Tecnología*, 15(2), 31-44. <https://doi.org/10.18779/cyt.v15i2.582>
- Suárez-Capello, C., Moreira-Duque, M., & Vera-Barahona, J. (1994). *Manual del cultivo de cacao*. Quevedo, Ecuador: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Ventimiglia, L., Carta, H., & Rillo, S. (2004). Azufre: Un caballo sin domar. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Vinces-Tachong, R. E., Vélez-Ruiz, M. C., Gaibor-Fernández, R. R., & Herrera-Eguez, F. E. (2022). Implementación del procesamiento de imágenes para la evaluación de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en maíz (*Zea mays*). *Terra Latinoamericana*, 40, 1-7. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1066>
- Walker, C. A., & van West, P. (2007). Zoospore development in the oomycetes. *Fungal Biology Reviews*, 21(1), 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2007.02.001>
- Williams, J. S., & Cooper, R. M. (2004). The oldest fungicide and newest phytoalexin: A reappraisal of the fungitoxicity of elemental sulphur. *Plant Pathology*, 53(3), 263-279. <https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.01010.x>
- Zarrillo, S., Gaikwad, N., Lanaud, C., Powis, T., Viot, C., Lesur, I., ... & Valdez, F. (2018). The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. *Nature Ecology & Evolution*, 2(12), 1879-1888. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0697-x>
- Zenda, T., Liu, S., Dong, A., & Duan, H. (2021). Revisiting sulphur—The once neglected nutrient: Its roles in plant growth, metabolism, stress tolerance and crop production. *Agriculture*, 11(7), 626. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070626>
- Zhao, F., Tausz, M., & De Kok, L. J. (2008). Role of sulfur for plant production in agricultural and natural ecosystems. In R. Hell, C. Dahl, D. B. Knaff, & T. Leustek (Eds.). *Sulfur metabolism in phototrophic organisms* (pp. 417-435). Dordrecht, The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6863-5_27