espoch | Facultad de Ciencias Pecuarias

CC BY NC

RECIENA

Revista Científica Agropecuaria



VOL. 6
Núm. 2
Mayo - octubre 2026
ISSN 2773-7608

Líneas de investigación:

- Ciencias agrícolas y agroindustriales
- Ciencias zootécnicas y biológicas
- Ciencia e ingeniería de Alimentos
- Ciencia e ingeniería de biomateriales
- Medicina animal
- Procesos agropecuarios y agroindustriales
- Economía, gerencia y negocios agropecuarios
- Aplicaciones de otras ciencias a estas áreas.

latindex catálogo 2.0

ERIHPLUS
EUROPEAN REFERENCE INDEX FOR THE HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

ISSN: 2773-7608
RECIENA.

Esta obra está bajo una licencia
internacional Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0.

Publicada por la Facultad de Ciencias Pecuarias
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Volumen 6 / Número 2, mayo – octubre 2026

Contenido

1	EFECTO COMBINADO DE MICORRIZAS Y ÁCIDOS HÚMICOS SOBRE EL CRECIMIENTO DEL MAÍZ (*ZEA MAYS* L.) EN CONDICIONES AMAZÓNICAS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (2020-2026) Ahinara Mena, Anahi Yascely Ramirez Zambrano, Jordy Javier Vera Cuenca.	6 - 20
2	EVALUACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL AIRE Y SUPERFICIES EN DIFERENTES ÁREAS DE CLÍNICAS VETERINARIAS Anthony Josué Bravo Solórzano, Félix Agustín Quijije Carranza, María Karolina López Rauschemberg, Manuel Patricio Lucas Basurto.	21 - 28
3	EVALUACIÓN DE LA ESTERASA PROSTÁTICA ESPECÍFICA CANINA (CPSE) Y EL VOLUMEN ECOGRÁFICO PROSTÁTICO POST-ORQUIECTOMÍA EN PERROS CON HIPERPLASIA PROSTÁTICA BENIGNA SUBCLINICA Antonio Murillo, Milena Martino.	29 - 36
4	BIOADSORBENTE DE MUSA PARADISIACA COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE AL CARBÓN ACTIVADO PARA LA REMOCIÓN DE CIANOBACTERIAS Y CIANOTOXINAS EN AGUA DEL RÍO DAULE, ECUADOR Villa Sánchez Fabiola, Coloma Coloma Tony, Briones Rosado Aleska, Maria Elisa Caiza Alay.	37 - 44
5	TOXOPLASMOSIS: UNA INFECCIÓN ZOONÓTICA GLOBAL, SUS MANIFESTACIONES CLÍNICAS Y ESTRATEGIAS DE MANEJO Jaime Javier Martínez Zambrano, Saul Santiago Tumbaco Salinas.	45 - 53
6	PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA COMO ESTRATEGIA DE AGROPRODUCCIÓN SOSTENIBLE EN EL CULTIVO DE TILAPIA EN PASTAZA Daysi Lorena Caiza López, Elsa Flor Ordoñez Bravo, Juan Carlos Caiza López, Marco Andrés Quishpe Mejía.	54 - 65
7	VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DEL CACAO MEDIANTE TECNOLOGÍAS EMERGENTES: EVIDENCIA, LIMITACIONES Y PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN Cristina Gisela Arias Arias.	66 - 70

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Revista RECIENA
Panamericana Sur, km 1 1/2
ESPOCH Facultad de Ciencias Pecuarias
Riobamba–Ecuador
Telf.: (+593) 299 8200 ext. 2401
eMail: reciena.fcp@espoch.edu.ec

espoch | Facultad de Ciencias Pecuarias

Equipo editorial

DIRECTORA GENERAL:

Ing. María Belén Bravo Avalos. PhD (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador).

EDITOR JEFE:

Ing. Luis Arboleda PhD. (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador).

COMITÉ EDITORIAL:

Miembros Comité Editorial:

- **Luis Eduardo Hidalgo Almeida** (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador).
- **Wilian Marcelo Bravo Morocho** (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador).
- **William Orlando Caicedo** (Universidad Estatal Amazónica, Ecuador).
- **Cira Duarte García** (Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria, Cuba).
- **Hugo López Insunza** (Universidad Autónoma de Sinaloa, México).
- **Begonia Peinado Ramón** (Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimenticio, España).
- **Ángel Poto Remacha** (Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimenticio, España).
- **Aldo Rodríguez Hernández** (Universidad de Chapingo, México).
- **Cecilia Rodríguez Haro** (Universidad Regional Amazónica IKIAM, Ecuador).

COMISIÓN DE SOPORTE

Soporte editorial y logístico:

- **Katherinne Sthefanny Díaz Sanchez** (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador).

Diseño portada, contraportada y diagramación:

- **José Luis Heredia Hermida** (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador).

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 24/05/2026 · *Aceptado:* 05/07/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/h49apg35

EFECTO COMBINADO DE MICORRIZAS Y ÁCIDOS HÚMICOS SOBRE EL CRECIMIENTO DEL MAÍZ (*ZEA MAYS L.*) EN CONDICIONES AMAZÓNICAS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (2020-2026)

COMBINED EFFECT OF MYCORRHIZAE AND HUMIC ACIDS ON MAIZE (*ZEA MAYS L.*) GROWTH UNDER AMAZONIAN CONDITIONS: A LITERATURE REVIEW (2020–2026)

[1] Ahinara Mena*	ahinara.mena@espoch.edu.ec
[1] Anahi Yascely Ramirez Zambrano	anahi.ramirez@espoch.edu.ec
[1] Jordy Javier Vera Cuenca	jordy.vera@espoch.edu.ec

[1] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Recursos Naturales, Puerto Francisco de Orellana, Ecuador.

E-mail: * ahinara.mena@espoch.edu.ec

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2026 sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) en condiciones amazónicas, identificando sus efectos fisiológicos, nutricionales y agronómicos, así como los mecanismos que explican su interacción en el suelo y la planta. La investigación correspondió a una revisión bibliográfica desarrollada conforme a las directrices PRISMA 2020. La búsqueda se realizó exclusivamente en la base de datos Scopus mediante una estrategia de búsqueda estructurada, obteniéndose 338 registros iniciales. Posteriormente, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión, además de un proceso de cribado manual, seleccionándose 76 artículos científicos para la síntesis cualitativa. La evidencia analizada mostró que las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen el crecimiento, la absorción de nutrientes, el desarrollo radicular y el rendimiento del maíz, especialmente en suelos ácidos y de baja disponibilidad de fósforo. Asimismo, los estudios que evaluaron su aplicación conjunta reportaron principalmente efectos aditivos o sinérgicos, aunque persiste una limitada evidencia obtenida directamente en condiciones amazónicas. Se concluye que la aplicación combinada de ambos bioestimulantes representa una estrategia sostenible con alto potencial para mejorar la productividad del maíz y la calidad del suelo; sin embargo, se requieren investigaciones de campo en la Amazonía que permitan validar estos resultados y fortalecer su aplicación en los sistemas agrícolas de la región.

Palabras clave: *Zea mays* L.*; absorción de nutrientes; ácidos húmicos; micorrizas arbusulares; productividad agrícola.*

ABSTRACT

This study aimed to analyze the scientific evidence published between 2020 and 2026 on the combined effects of arbuscular mycorrhizal fungi and humic acids on the growth of maize (Zea mays L.) under Amazonian conditions, identifying their physiological, nutritional, and agronomic effects, as well as the mechanisms underlying their interaction in the soil–plant system. The research consisted of a literature review conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines. The literature search was performed exclusively in the Scopus database using a structured search strategy, yielding 338 initial records. After applying the inclusion and exclusion criteria and conducting a manual screening process, 76 scientific articles were selected for qualitative synthesis. The reviewed evidence showed that arbuscular mycorrhizal fungi and humic acids consistently improve maize growth, nutrient uptake, root development, and yield, particularly in acidic soils with low phosphorus availability. Studies evaluating their combined application mainly reported additive or synergistic effects; however, scientific evidence obtained directly under Amazonian conditions remains limited. It is concluded that the combined use of these biostimulants represents a sustainable strategy with high potential to improve maize productivity and soil quality. Nevertheless, field studies conducted under Amazonian conditions are still needed to validate these findings and support their implementation in regional agricultural systems.

Keywords: *Zea mays L.; arbuscular mycorrhizal fungi; humic acids; agricultural productivity; nutrient uptake.*

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial enfrenta el desafío de aumentar la productividad de los cultivos básicos sin profundizar el deterioro de los suelos ni la dependencia de insumos químicos de síntesis. El maíz (*Zea mays* L.), como uno de los cereales de mayor relevancia alimentaria y económica a nivel global, ha sido uno de los cultivos más estudiados en la búsqueda de alternativas de manejo que concilien productividad y sostenibilidad [1]. En este contexto, los bioestimulantes agrícolas, entendidos como sustancias o microorganismos capaces de modificar procesos fisiológicos de las plantas, independientemente de su contenido nutricional, han adquirido un papel central dentro de las estrategias de intensificación sostenible, al ofrecer mecanismos complementarios o alternativos a la fertilización convencional [2].

Entre los bioestimulantes con mayor evidencia científica acumulada en los últimos años destacan las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos. Las micorrizas arbusculares establecen asociaciones simbióticas con las raíces del maíz que amplían la superficie efectiva de exploración del suelo y facilitan la absorción de fósforo y otros nutrientes de baja movilidad [3], mientras que los ácidos húmicos, como fracción bioactiva de la materia orgánica del suelo, actúan sobre la fisiología vegetal al estimular la división celular, la fotosíntesis y la síntesis de aminoácidos [4], [5], además de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Diversos estudios recientes han evaluado ambos bioestimulantes de forma individual [6], [7], [8] y, en un número más reducido de investigaciones, de manera combinada [9], [10], [11], [12], [13], reportando, en términos generales, efectos positivos sobre el crecimiento, la nutrición y el rendimiento del maíz.

Sin embargo, la evidencia disponible proviene mayoritariamente de estudios desarrollados en condiciones edafoclimáticas templadas, mediterráneas o áridas. China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia concentran la mayor parte de la producción científica reciente sobre el tema, mientras que las condiciones amazónicas, caracterizadas por suelos ácidos, de baja fertilidad natural y elevada lixiviación de nutrientes, permanecen prácticamente ausentes de la literatura científica primaria. Esta brecha resulta especialmente relevante porque la eficacia de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos depende, en gran medida, de las condiciones edáficas iniciales. En suelos con alta disponibilidad de fósforo, por ejemplo, la respuesta micorrízica del maíz puede ser limitada o incluso negativa, mientras que, en suelos de baja fertilidad, como los predominantes en la Amazonía, la dependencia micorrízica del cultivo tiende a ser mayor [3]. En consecuencia, los resultados obtenidos en otras regiones solo pueden extrapolarse de manera parcial a los sistemas amazónicos, lo que pone de manifiesto la necesidad de analizar críticamente la evidencia científica disponible antes de proponer su aplicación en estos ambientes.

Frente a este panorama, la presente revisión bibliográfica tuvo como objetivo analizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2026 sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) en condiciones amazónicas, identificando sus efectos fisiológicos, nutricionales y agronómicos, así como los mecanismos que explican su interacción en el sistema suelo-planta. Asimismo, se buscó sintetizar las principales tendencias de investigación, los avances alcanzados y los vacíos de conocimiento identificados en la literatura científica, con el propósito de aportar una base teórica que oriente futuras investigaciones y contribuya al desarrollo de estrategias de manejo sostenible para los sistemas agrícolas amazónicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología de búsqueda y selección de artículos

Los procedimientos de revisión de la literatura científica sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) se llevaron a cabo siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta metodología fue seleccionada debido a su amplia aceptación en revisiones sistemáticas y a su capacidad para garantizar la transparencia, reproducibilidad y rigurosidad científica durante los procesos de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de estudios, permitiendo establecer criterios claros para la recopilación, depuración y síntesis de la evidencia científica disponible sobre la temática de estudio [14].

Fuentes de información y búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en la base de datos científica Scopus, debido a su amplia cobertura de literatura indexada en ciencias agrícolas y ambientales y su reconocimiento internacional en la difusión de investigaciones de alto impacto. Para la recuperación de información se consideraron los campos de título, resumen y palabras clave de cada documento.

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante la combinación de términos relacionados con el maíz (*Zea mays* L.) y las dos categorías de bioestimulantes de interés micorrizas arbusculares y ácidos húmicos, utilizando los operadores booleanos "AND" y "OR" para ampliar y refinar la recuperación de estudios potencialmente relevantes. La ecuación de búsqueda utilizada se presenta en la Tabla 1.

Criterios de elegibilidad

La búsqueda se limitó a artículos científicos publicados entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de diciembre de 2026, en idioma inglés o español. Posteriormente, la base de datos fue refinada mediante la aplicación de criterios de elegibilidad previamente establecidos con el fin de garantizar la pertinencia y calidad de la evidencia científica recopilada. Los estudios incluidos debían cumplir con las siguientes condiciones: i) estar relacionados directamente con el cultivo de maíz (*Zea mays* L.); ii) evaluar la aplicación de micorrizas arbusculares, ácidos húmicos o su combinación; iii) reportar variables de respuesta asociadas al crecimiento, desarrollo, biomasa, absorción de nutrientes, desarrollo radicular, rendimiento, productividad o calidad del suelo.

Fueron excluidos los documentos duplicados, tesis, capítulos de libro, editoriales, resúmenes de congresos, revisiones bibliográficas y publicaciones sin acceso al texto completo. Del mismo modo, se descartaron estudios realizados en especies distintas al maíz, investigaciones centradas exclusivamente en otros biofertilizantes o microorganismos no relacionados con micorrizas o ácidos húmicos, y menciones incidentales de los términos de búsqueda sin relación real con el objeto de estudio.

Estrategia de búsqueda e identificación de estudios

La identificación de estudios se realizó mediante una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus, considerando los campos de título, resumen y palabras clave. La plantilla del diagrama de flujo PRISMA 2020 (Figura 1) fue utilizada para documentar el proceso de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de los estudios considerados en esta revisión.

1. **Identificación:** Se definieron términos y palabras clave relacionados con el maíz y los bioestimulantes de interés, aplicándose la estrategia de búsqueda en Scopus (Tabla 1), obteniéndose un total de **338 registros bibliográficos**.

2. **Selección y elegibilidad:** Los 338 registros fueron sometidos a una revisión automatizada de títulos, resúmenes y palabras clave según los criterios de elegibilidad, resultando en **105 documentos** aptos para lectura crítica. Tras la revisión detallada de estos 105 estudios, se excluyeron **29 documentos** por corresponder a especies distintas al maíz, presentar menciones incidentales de los términos de búsqueda o no reportar una aplicación real de micorrizas o ácidos húmicos como tratamiento.

3. **Inclusión:** Finalmente, **76 artículos científicos** cumplieron con todos los criterios de inclusión y fueron incorporados a la síntesis cualitativa final. Los estudios seleccionados fueron organizados en una matriz de extracción de datos elaborada en Microsoft Excel, permitiendo la sistematización de la información bibliográfica, metodológica y temática utilizada para el análisis y la elaboración de tablas y figuras.

Tabla 1. *Estrategia de búsqueda utilizada para la identificación de estudios relacionados con el efecto combinado de micorrizas y ácidos húmicos en maíz.*

Base de datos	Cadena de búsqueda
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((maize OR corn OR "Zea mays") AND (mycorrhiza* OR "arbuscular mycorrhiza*" OR AMF OR "mycorrhizal fungi") AND (humic* OR "humic acid*" OR "humic substances" OR humate*))

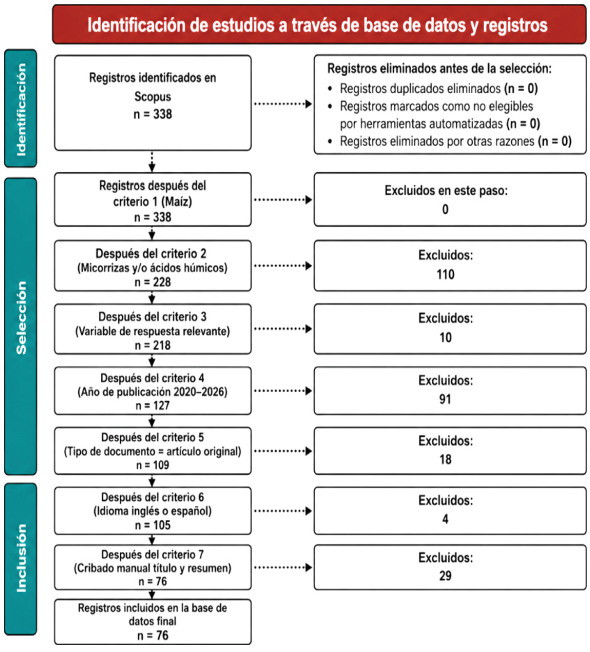


Figura 1. *Diagrama de flujo del proceso de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de estudios sobre el efecto combinado de micorrizas y ácidos húmicos en maíz, elaborado de acuerdo con las directrices PRISMA 2020.*

Análisis de datos

Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se realizó con el propósito de identificar las principales tendencias de investigación sobre el efecto combinado de micorrizas y ácidos húmicos en maíz durante el período 2020–2026. Se evaluó la evolución temporal de las publicaciones científicas mediante el registro del número de artículos publicados por año, así como la contribución de los países participantes en las investigaciones, identificándose a China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia como los principales aportantes.

Análisis sistemático

El análisis sistemático se centró en la síntesis e interpretación de la evidencia científica contenida en los 76 estudios seleccionados. Para ello, los artículos fueron clasificados en tres categorías temáticas principales, alineadas con los objetivos específicos de la investigación: efectos individuales y combinados de las micorrizas y los ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del maíz; mecanismos fisiológicos y edáficos de dicha interacción; e importancia agronómica y ambiental de su aplicación combinada como estrategia sostenible. La información recopilada fue organizada en matrices de análisis elaboradas en Microsoft Excel, permitiendo la sistematización de resultados y la elaboración de tablas y figuras de síntesis.

3. RESULTADOS

a) Análisis bibliométrico

Evolución de la producción científica (2020–2026). El análisis de la distribución temporal de los 76 artículos incluidos evidencia una producción científica sostenida a lo largo de todo el período evaluado, sin variaciones abruptas: 10 artículos en 2020, 12 en 2021, 9 en 2022, 8 en 2023, 12 en 2024, 14 en 2025 y 11 en lo que va de 2026. Este comportamiento indica que el interés investigativo por el uso combinado o individual de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en maíz no es un fenómeno emergente puntual, sino una línea de investigación consolidada que se ha mantenido activa de manera constante durante los últimos siete años, con un ligero repunte en 2025.

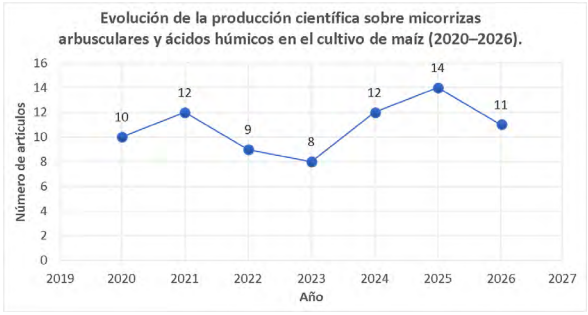


Figura 2. *Evolución anual de las publicaciones científicas incluidas en la revisión bibliográfica (2020–2026).*

Contribución de los países. Los 76 estudios incluidos fueron desarrollados por autores afiliados a 25 países distintos, lo que refleja una dispersión geográfica amplia del interés científico sobre la temática. China concentra la mayor producción (14 artículos, 18,4%), seguida de Brasil (9; 11,8%), y de un bloque intermedio conformado por Italia, Marruecos e Indonesia (6 artículos cada uno; 7,9%). India, Estados Unidos, Arabia Saudita y Egipto aportan 3 estudios cada uno, mientras que el resto de países (Pakistán, México, Bélgica, Polonia, Irán, Colombia, Kazajistán, entre otros) contribuyen con 1 o 2 artículos. Es relevante señalar que, si bien ningún país amazónico figura entre los principales aportantes, buena parte de la producción proviene de contextos con condiciones edáficas y climáticas comparables suelos tropicales o subtropicales de baja fertilidad en Brasil, Indonesia, Marruecos y Egipto, lo que otorga cierta pertinencia indirecta a estos hallazgos para su eventual extrapolación a sistemas amazónicos.



Figura 3. *Principales países cooperantes en la producción científica sobre micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en el cultivo de maíz (Zea mays L.) durante el período 2020–2026.*

Coocurrencia de palabras clave. El análisis de las palabras clave declaradas por los propios autores permite identificar los principales enfoques temáticos de la literatura revisada. Los términos con mayor frecuencia fueron *maize* (12 apariciones), *arbuscular*

mycorrhizal fungi (8) y *humic substances* (8), seguidos de *biostimulant/biostimulants* (13 en conjunto), *compost* (6), *soil fertility* (6) y *sustainable agriculture* (5). La presencia recurrente de términos como *soil amendment*, *phosphorus, abiotic stress* y *antioxidants* sugiere que gran parte de la investigación reciente no solo evalúa el efecto de estos bioestimulantes sobre el crecimiento del maíz per se, sino que los enmarca dentro de estrategias más amplias de manejo sostenible del suelo y de mitigación de estrés abiótico (hídrico, salino, por metales pesados), un enfoque directamente relevante para las condiciones amazónicas.

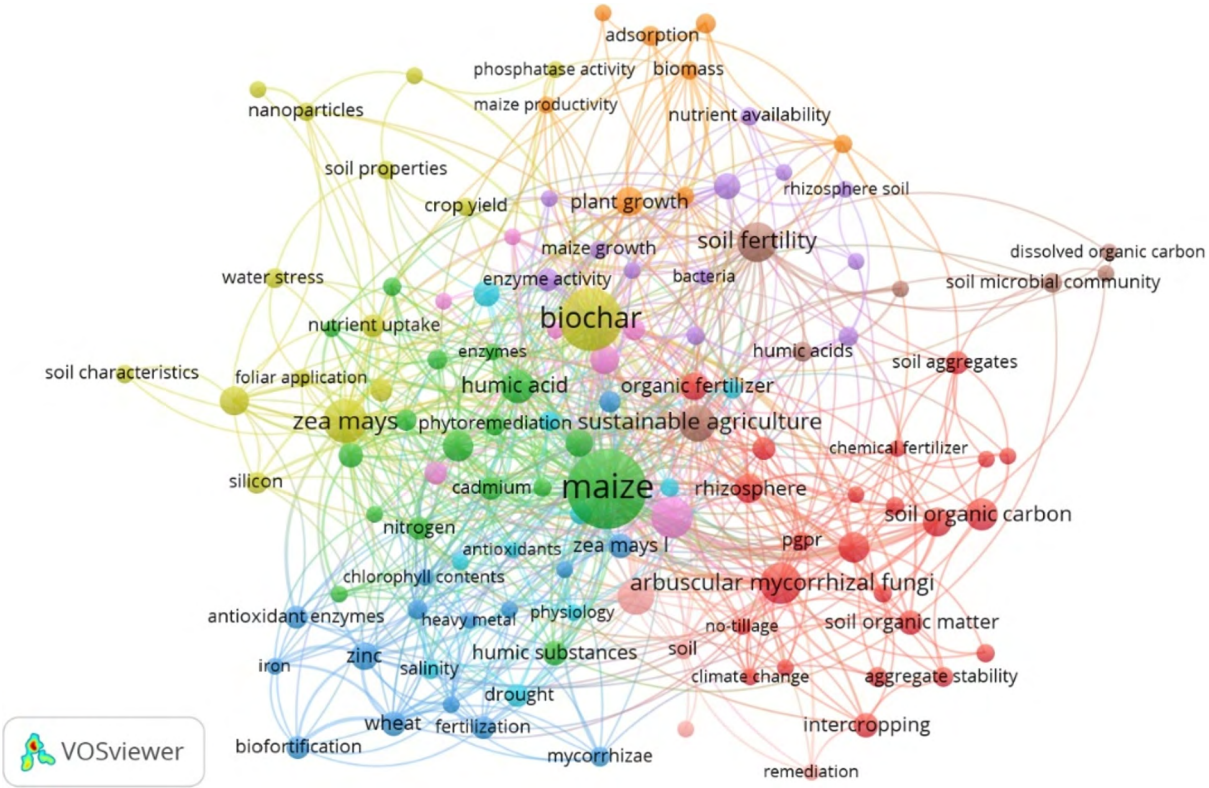


Figura 4. *Red de coocurrencia de palabras clave de la producción científica sobre micorrizas arbusculares, ácidos húmicos y maíz (Zea mays L.).*

b) Efectos de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del maíz



Figura 5. *Síntesis de los efectos individuales y combinados de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del maíz, con mayor magnitud de respuesta en suelos de baja disponibilidad de fósforo, condición característica de los suelos amazónicos.*

Efectos de las micorrizas arbusculares aplicadas de forma individual. La mayoría de los estudios que evaluaron la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en maíz reportaron efectos positivos sobre variables de crecimiento, biomasa y rendimiento, aunque con una magnitud claramente dependiente del contexto edáfico. [15] observaron que la combinación de endomicorrizas con fosfocompost incrementó la longitud aérea del maíz de 90 a 210 cm y el número de hojas de 11 a 14 respecto al control. De manera similar, [16] reportaron rendimientos de semilla de hasta 8 198,5 kg/ha bajo labranza combinada con materia orgánica y hongos micorrízicos, mientras que [17] documentaron incrementos de 42,4% en altura y 117,6% en biomasa tras enmiendas orgánicas derivadas de caracoles manzana que favorecieron la colonización micorrízica. [18], [19], [20] coinciden en que la inoculación micorrízica combinada con fertilización orgánica o biofertilizantes mejora significativamente la productividad del maíz en suelos marginales o de baja fertilidad, condición estructuralmente similar a la de los suelos amazónicos.

No obstante, la evidencia no es unánime. [21] encontraron, en condiciones de campo, que la

respuesta micorrízica del maíz varía sustancialmente según la disponibilidad de fósforo del suelo, siendo positiva en la fase vegetativa bajo baja fertilidad, pero sin traducirse necesariamente en mayor rendimiento final. En la misma línea, [22] reportaron recientemente la ausencia de beneficios sinérgicos o complementarios entre hongos micorrízicos arbusculares y enmiendas orgánicas cuando se aplican de forma simultánea, lo que evidencia que el efecto de las micorrizas no es universal ni automáticamente aditivo con otras prácticas de manejo (véanse también [12], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

Efectos de los ácidos húmicos aplicados de forma individual. La aplicación de ácidos húmicos y sustancias húmicas afines mostró de manera consistente efectos positivos sobre la germinación, el crecimiento inicial y el rendimiento del maíz. [2] reportaron incrementos de rendimiento de 41,5 a 61 quintales por hectárea mediante la combinación de ácido húmico con extracto de algas, mientras que [36] documentaron aumentos de hasta 37% en longitud de mazorca y 11% en absorción de potasio al sustituir parcialmente la fertilización mineral por ácidos húmicos y aminoácidos. En un ensayo a gran escala con 448 parcelas comerciales, [37] encontraron que una sola aplicación foliar de bioestimulante húmico incrementó el rendimiento entre 7,6% y 15,7%, con un retorno económico adicional de 122 USD/ha. De forma consistente, observaron incrementos en la biomasa aérea del maíz incluso reduciendo en 40% la fertilización NPK convencional cuando esta se combinaba con sustancias húmicas.

Otros estudios aportan evidencia sobre condiciones de estrés: [38] reportaron que el ácido húmico redujo la acumulación de cadmio en las raíces del maíz mientras incrementaba su biomasa, y [4] demostraron que las sustancias húmicas incrementan hasta en 21% la incorporación de nitrógeno vía absorción directa de aminoácidos en plántulas de maíz. Resultados adicionales en esta misma dirección fueron reportados por [1], [6], [8], [13], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]. Cabe destacar, sin embargo, que [50] reportaron que el efecto de estos bioestimulantes tiende a diluirse en evaluaciones de largo plazo, lo que sugiere la necesidad de considerar la persistencia temporal del efecto y no únicamente su respuesta inmediata.

Efectos de la aplicación combinada. Un número más reducido pero creciente de estudios ha evaluado la aplicación simultánea de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos. [9] encontraron que la combinación de hongos micorrízicos, *Azotobacter, Bacillus* y ácido húmico mejoró de forma conjunta el crecimiento, el rendimiento de grano y la calidad nutricional (azúcares, almidón y proteína) del maíz híbrido. [10] reportaron que la combinación de bacterias solubilizadoras de fósforo, ácidos húmicos y micorrizas arbusculares produjo la mayor absorción de fósforo entre todos los tratamientos evaluados, modificando además la composición del microbioma del suelo. De manera más reciente, [51] documentaron incrementos de hasta 18% en el rendimiento de maíz forrajero mediante la aplicación conjunta de ácido húmico y hongos micorrízicos en el subsuelo, mientras que [52] observaron mejoras en altura, diámetro y biomasa del maíz con té de compost enriquecido con ácido húmico, aunque sin afectar significativamente la tasa de colonización micorrízica, lo que sugiere que ambos bioestimulantes pueden actuar mediante vías complementarias pero no necesariamente dependientes entre sí.

En conjunto, la evidencia disponible indica que tanto las micorrizas arbusculares como los ácidos húmicos generan, de manera predominante, efectos positivos sobre el crecimiento y el rendimiento del maíz, con una magnitud de respuesta que depende fuertemente de la fertilidad basal del suelo siendo mayor en suelos pobres en fósforo y materia orgánica, condición característica de los suelos amazónicos, mientras que su aplicación combinada, aunque menos estudiada, muestra en la mayoría de los casos efectos aditivos o sinérgicos, aunque no siempre estadísticamente superiores a la aplicación individual de cada bioestimulante.

c) Mecanismos fisiológicos y edáficos de la interacción entre micorrizas arbusculares y ácidos húmicos

Más allá de los efectos observables sobre el crecimiento y el rendimiento, un conjunto de estudios recientes ha profundizado en los mecanismos moleculares, fisiológicos y edáficos que explican por qué las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen la nutrición y el desarrollo del maíz, aportando evidencia de nivel genético, enzimático y metabolómico que respalda los resultados agronómicos descritos previamente.

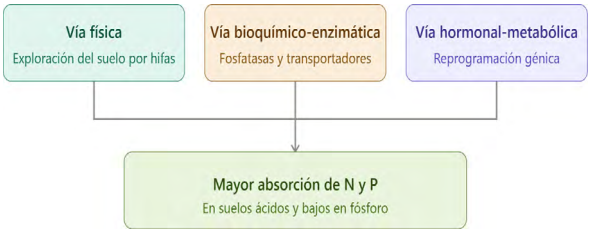


Figura 6. *Vías mecanísticas complementarias —física, bioquímico-enzimática y hormonal-metabólica— mediante las cuales las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular del maíz en condiciones edáficas.*

Mecanismos de absorción de nitrógeno y fósforo. A nivel molecular, [53] demostraron que las sustancias húmicas disueltas incrementan la absorción de nitrato en maíz mediante la sobreexpresión de genes transportadores y reguladores clave del metabolismo del nitrógeno (entre ellos *ZmNRT2.1, ZmNRT2.2* y *ZmNADH:NR)*, evidenciando que el efecto bioestimulante no es meramente nutricional, sino que opera mediante la activación de rutas génicas específicas. De forma complementaria, [54] reportaron que los lignohumatos incrementan la eficiencia de adquisición de fósforo en maíz al estimular la actividad de enzimas fosfatasas y fitasas, junto con cambios transcriptómicos en genes asociados a la señalización hormonal y al reciclaje interno de fósforo. Por su parte, [55] evaluaron distintas generaciones de cultivos de hongos micorrízicos arbusculares, encontrando que las cepas de segunda generación incrementaron la absorción de fósforo entre 80% y 97%, y el peso seco de la parte aérea entre 89% y 103%, lo que sugiere que la calidad y el manejo del inóculo micorrízico son determinantes tan importantes como su sola presencia.

Reprogramación metabólica y hormonal. A nivel bioquímico, [56] caracterizaron mediante metabolómica no dirigida más de 500 metabolitos afectados por las sustancias húmicas en maíz, identificando alteraciones en el metabolismo de almidón y sacarosa, en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (ciclo de Krebs) y en rutas de señalización hormonal tanto dependientes como independientes de fitohormonas clásicas. En un hallazgo particularmente relevante para condiciones de estrés edáfico como las que caracterizan a los suelos amazónicos, [57] encontraron que el ácido húmico artificial activa las rutas de biosíntesis de fenilpropanoides, fosforilación oxidativa y transducción de señales hormonales en plántulas de maíz sometidas a condiciones alcalinas, favoreciendo su tolerancia. De manera similar, [58] reportaron que, si bien el ácido húmico altera el ciclo de los ácidos tricarboxílicos durante la germinación, este efecto se traduce en una mejora de la resistencia a sequía en la progenie de la planta, mediada por la regulación positiva de la síntesis de ácidos grasos insaturados y alcaloides. [59] confirmaron efectos similares mediante la aplicación de ácido fúlvico exógeno vía riego al suelo, reforzando la promoción del crecimiento por vías fisiológicas convergentes.

Interacción combinada micorriza–ácido húmico a nivel metabólico. El estudio más directamente relacionado con el efecto combinado de ambos bioestimulantes, [60], demostró mediante perfilado de metabolitos que la aplicación conjunta de hongos micorrízicos arbusculares y ácido húmico mejora sustancialmente el metabolismo de azúcares en granos de maíz, evidenciando que la interacción entre ambos bioestimulantes no se limita a una simple suma de efectos independientes, sino que genera respuestas metabólicas específicas de la combinación.

Síntesis mecanística. En conjunto, esta evidencia permite identificar al menos tres vías mecanísticas complementarias mediante las cuales las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos favorecen la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular del maíz: (i) una vía de exploración física del suelo, mediada por la red de hifas micorrízicas que amplía el volumen de suelo explorado por el sistema radicular; (ii) una vía bioquímico-enzimática, mediada por la activación de fosfatasas, fitasas y transportadores de nutrientes; y (iii) una vía de señalización hormonal y metabólica, mediada por la reprogramación transcripcional y metabolómica inducida por las sustancias húmicas. Estas tres vías resultan especialmente pertinentes para suelos ácidos y de baja disponibilidad de fósforo como los predominantes en la Amazonía, en la medida en que atacan simultáneamente las principales limitantes edáficas de dichos sistemas: la baja movilidad del fósforo, la reducida actividad biológica del suelo y la susceptibilidad de las plantas al estrés abiótico asociado a suelos ácidos.

d) Importancia agronómica y ambiental de la aplicación combinada como estrategia sostenible



Figura 7. *Aportes de la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos como estrategia agronómica y ambientalmente sostenible, mediante la reducción de insumos químicos, la mitigación de estrés abiótico (hídrico y salino) y la fitorremediación.*

Sostenibilidad y reducción de insumos químicos. Uno de los principales argumentos que sustentan el uso combinado de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos es su capacidad para reducir la dependencia de fertilizantes minerales sin comprometer la productividad. [11] evaluaron un acondicionador de suelo enriquecido con biofertilizantes incluyendo micorrizas y ácido húmico sobre andisoles, encontrando mejoras simultáneas en la fertilidad del suelo y el crecimiento del maíz. En la misma dirección, [61] reportaron que el manejo integrado de nutrientes incrementó las fracciones activas y pasivas de materia

orgánica del suelo, incluyendo el contenido de ácidos húmicos, mientras que [62] documentaron que la intercalación de maíz con abono verde incrementó el pH del suelo, la actividad enzimática y el beneficio económico del sistema en 56,4%, evidenciando que estas estrategias no solo tienen impacto agronómico sino también económico.

Mitigación de estrés abiótico. Una línea de evidencia particularmente relevante para las condiciones amazónicas es la capacidad de estos bioestimulantes para mitigar distintos tipos de estrés abiótico. [4] demostraron que los ácidos húmicos actúan como agentes de "priming" químico, preparando fisiológicamente al maíz frente a múltiples estresores (salinidad, sequía, cromo), mientras que [63] confirmaron que este acondicionamiento mejora la tolerancia a la salinidad en maíz y tomate mediante el balance iónico, la actividad de bombas de protones y la eficiencia fotosintética. Frente al estrés hídrico de particular relevancia en la variabilidad hídrica amazónica, [64], [65] reportaron que el ácido húmico mejora la tolerancia a la sequía en maíz de forma más marcada que en sorgo, con incrementos de hasta 29,2% en la tasa fotosintética. De manera complementaria, [66], [67] encontraron que la combinación de compost, micorrizas arbusculares y nanopartículas de carbono mitigó el estrés por sequía, incrementando la biomasa en 20,1% bajo condiciones normales y en 39,4% bajo sequía, mientras que [68] reportaron incrementos de hasta 238% en biomasa aérea de maíz dulce bajo estrés salino mediante bioestimulantes indígenas (compost, Bacillus y micorrizas).

Fitorremediación y calidad ambiental del suelo. La aplicación combinada de estos bioestimulantes también ha mostrado beneficios en la remediación de suelos contaminados, un aspecto de creciente relevancia en zonas de frontera agrícola amazónica afectadas por actividades extractivas. [69] reportaron que un extracto alcalino de vermicompost redujo el estrés inducido por arsénico en maíz, incrementando su capacidad de fitoextracción, mientras que [70], [71] documentaron que la combinación de biocarbón y hongos micorrízicos arbusculares promovió el crecimiento del maíz al tiempo que redujo la biodisponibilidad de plomo y mitigó el estrés inducido por cobalto, respectivamente. Más recientemente, [72], [73] confirmaron que la co-inoculación de compost con hongos micorrízicos y bacterias endofíticas, o su combinación con enmiendas orgánicas, alivia eficazmente el estrés hídrico y salino en maíz, reforzando el papel de estas estrategias como herramientas de adaptación agroambiental. Evidencia adicional en esta línea fue aportada por [3], [74], [75]

Síntesis. En conjunto, esta evidencia respalda la hipótesis de que la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos constituye una estrategia agronómica y ambientalmente pertinente para sistemas de baja fertilidad y alta vulnerabilidad ambiental como los amazónicos, no solo por su efecto directo sobre el crecimiento del maíz, sino por su contribución a la reducción de insumos químicos, la mitigación de estrés hídrico y salino, y la recuperación de suelos degradados o contaminados, tres desafíos centrales para la sostenibilidad de la agricultura en la región.

e) 3.5 Tendencias, avances y vacíos de investigación entre 2020 y 2026



Figura 8. *Evolución temporal del enfoque de investigación entre 2020 y 2026, desde evaluaciones agronómicas convencionales hacia enfoques mecanísticos y de mitigación de estrés abiótico. Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica.*

Tendencias temporales. El análisis de la distribución anual de los 76 artículos incluidos permite identificar un cambio cualitativo en el enfoque de la investigación a lo largo del período. Entre 2020 y 2022, la mayoría de los estudios se concentraron en evaluaciones agronómicas convencionales crecimiento, biomasa y rendimiento bajo condiciones de fertilidad contrastante [15], [16], [21]. A partir de 2022–2023 se observa un giro progresivo hacia enfoques mecanísticos de mayor resolución, con la incorporación de herramientas metabolómicas y transcriptómicas [54], [56], [57], [58], y hacia la evaluación de estos bioestimulantes como herramientas de mitigación de estrés abiótico sequía, salinidad, metales pesados [64], [65], [66], [67], [68], [71]). Este desplazamiento sugiere que la comunidad científica ha superado la pregunta inicial de "si funcionan" para concentrarse en "cómo funcionan" y "en qué condiciones de estrés son más útiles", una evolución que resulta favorable para su eventual aplicación en contextos ambientalmente exigentes como la Amazonía.

Avances metodológicos. Un avance notable es la diversificación de las fuentes de ácidos húmicos evaluadas lignito, compost, estiércol de cabra, vermicompost, síntesis artificial e incluso subproductos agroindustriales como el rastrojo de maíz o el estiércol porcino [7], [13], [46], lo que amplía las opciones de obtención de este insumo bajo un enfoque de economía circular, particularmente relevante en sistemas amazónicos con alta disponibilidad

de biomasa residual pero acceso limitado a insumos comerciales importados. Asimismo, se observa un interés creciente por optimizar la calidad del inóculo micorrízico evaluando generaciones sucesivas de cultivo [55] o sustratos alternativos de producción, como lodos de depuradora [25] más allá de la sola presencia o ausencia de inoculación.

Vacíos de investigación identificados. No obstante, estos avances, la revisión permite identificar al menos cuatro vacíos relevantes:

1. **Ausencia de estudios en condiciones amazónicas específicas.** Ninguno de los 76 artículos incluidos fue desarrollado directamente en suelos o climas amazónicos; la evidencia disponible proviene principalmente de China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia, lo que limita la validez directa de las conclusiones para la región y refuerza la necesidad de investigación primaria local.

2. **Desbalance entre estudios individuales y combinados.** Del total de artículos revisados, solo 6 evaluaron de manera simultánea y explícita la combinación de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos [9], [10], [11], [51], [52], [60], frente a 33 estudios centrados únicamente en micorrizas y 37 únicamente en ácidos húmicos. Esta asimetría limita la capacidad de establecer conclusiones robustas sobre la naturaleza exacta de la interacción (aditiva, sinérgica o neutra) entre ambos bioestimulantes.

3. **Heterogeneidad metodológica y resultados contradictorios.** La comparación entre estudios se ve dificultada por la falta de estandarización en dosis, especies fúngicas, fuentes de ácido húmico y condiciones edáficas de partida. Esta heterogeneidad explica, en parte, hallazgos aparentemente contradictorios como los de [22], quienes no encontraron beneficios sinérgicos entre micorrizas y enmiendas orgánicas, en contraste con la mayoría de estudios que sí reportan sinergias positivas; o los de [50], que documentaron una pérdida de efectividad de los bioefectores en evaluaciones de largo plazo.

5. **Escasa evaluación de la persistencia temporal del efecto.** La gran mayoría de los estudios revisados evalúan respuestas de corto plazo (una temporada de cultivo), existiendo muy poca evidencia sobre la persistencia de los beneficios de estos bioestimulantes en ciclos de cultivo sucesivos o sobre su efecto acumulativo en la fertilidad del suelo a mediano y largo plazo.

Estos vacíos constituyen, en conjunto, la base argumentativa central para justificar la pertinencia y necesidad de investigación primaria sobre el efecto combinado de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en el cultivo de maíz bajo condiciones amazónicas específicas.

4. DISCUSIÓN

Sección	Descripción
Introducción del hallazgo principal	La mayoría de los estudios analizados coinciden en que tanto las micorrizas arbusculares como los ácidos húmicos generan efectos positivos sobre el crecimiento, la nutrición y el rendimiento del maíz, con una magnitud de respuesta que depende fuertemente de la fertilidad basal del suelo: el beneficio es mayor en suelos ácidos y pobres en fósforo [3], [21], condición que coincide con la de los suelos amazónicos. Asimismo, los seis estudios que evaluaron explícitamente la combinación de ambos bioestimulantes [9], [10], [11], [51], [52], [60] reportan de manera consistente efectos aditivos o sinérgicos, lo que constituye el principal hallazgo que sustenta la hipótesis central de esta revisión.
Análisis de la literatura	Los estudios revisados abordan el problema desde tres enfoques complementarios. Un primer grupo, mayoritario, evalúa efectos agronómicos convencionales biomasa, altura, rendimiento bajo condiciones de fertilidad contrastante [15], [16], [18]. Un segundo grupo, de aparición más reciente (2022–2026), profundiza en mecanismos fisiológicos y moleculares mediante herramientas transcriptómicas y metabolómicas [53], [54], [56], [57], [76], lo que ha permitido pasar de documentar *que* estos bioestimulantes funcionan a explicar *cómo* lo hacen. Un tercer grupo enfoca su análisis en la mitigación de estrés abiótico sequía, salinidad, metales pesados como criterio de eficacia [64], [65], [66], [71], [77], un enfoque que resulta especialmente pertinente para las condiciones amazónicas. Los tres enfoques son convergentes en sus conclusiones generales, pero divergen en el nivel de evidencia que aportan: mientras los estudios agronómicos documentan el efecto, los mecanísticos lo explican y los de estrés abiótico lo condicionan.

Comparación con la literatura previa	Los hallazgos de esta revisión amplían, más que contradicen, la literatura previa sobre biofertilización de maíz. La relación inversa entre fertilidad de fósforo y beneficio micorrízico documentada por [3] confirma un patrón ya reportado en la literatura clásica sobre simbiosis micorrízica, y esta revisión aporta evidencia actualizada (2020–2026) que lo sostiene en un rango amplio de condiciones edáficas. Sin embargo, no toda la evidencia reciente es consistente: el hallazgo de [22] ausencia de beneficios complementarios entre micorrizas y enmiendas orgánicas contradice directamente la tendencia predominante, al igual que el reporte de [50] sobre la pérdida de efectividad de los bioefectores en el largo plazo. Estas discrepancias no invalidan la tendencia general, pero advierten contra una lectura excesivamente optimista o universal de los beneficios reportados.
Identificación de brechas	La revisión permite identificar una falta de consenso clara en dos aspectos: (i) la naturaleza exacta de la interacción combinada aditiva, sinérgica o independiente, dado que [52] reportan mejoras agronómicas sin cambios en la colonización micorrízica, sugiriendo vías de acción parcialmente independientes; y (ii) la persistencia temporal del efecto, evaluada en muy pocos estudios más allá de una temporada de cultivo. A esto se suma la ausencia total de estudios primarios en condiciones amazónicas específicas, siendo China, Brasil, Italia, Marruecos e Indonesia los principales aportantes de evidencia. Estas brechas sugieren como dirección futura prioritaria el diseño de ensayos de campo combinados (micorriza + ácido húmico), con seguimiento multianual, realizados directamente en suelos ácidos de baja fertilidad representativos de la Amazonía.
Limitaciones de la revisión	Esta revisión presenta limitaciones que deben reconocerse. Primero, la búsqueda se restringió a la base de datos Scopus y a los idiomas inglés y español, lo que pudo excluir literatura relevante indexada en otras bases (por ejemplo, WoS, SciELO o Redalyc) o publicada en portugués, idioma predominante en gran parte de la investigación agrícola amazónica brasileña. Segundo, los criterios de inclusión exigieron reportar variables de respuesta específicas, lo que pudo excluir estudios cualitativos o de enfoque exclusivamente edafológico con relevancia indirecta para el tema. Tercero, la heterogeneidad metodológica entre los 76 estudios en dosis, cepas fúngicas, fuentes de ácido húmico y diseño experimental limita la posibilidad de realizar una síntesis cuantitativa (meta-análisis) y obliga a una interpretación cualitativa de los hallazgos, con el grado de subjetividad que ello implica.
Implicaciones prácticas o teóricas	A nivel teórico, esta revisión refuerza la plausibilidad biológica de que las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos actúan mediante mecanismos complementarios exploración física del suelo, activación enzimática y reprogramación hormonal cuya relevancia se maximiza precisamente en las condiciones edáficas limitantes que caracterizan a la Amazonía. A nivel práctico, los hallazgos ofrecen una base para el diseño de estrategias de manejo agronómico de bajo costo e insumos locales (compost, ácido húmico de origen orgánico, inóculo micorrízico) orientadas a productores de agricultura familiar amazónica con acceso restringido a fertilizantes minerales, contribuyendo potencialmente a la seguridad alimentaria regional sin incrementar la presión sobre los ecosistemas forestales circundantes.
Conclusión final	En síntesis, la evidencia revisada respalda de forma consistente aunque todavía parcial el potencial de la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos como estrategia agronómica sostenible para el maíz, con una plausibilidad biológica particularmente alta para suelos ácidos y de baja fertilidad como los amazónicos. No obstante, la ausencia de estudios primarios realizados directamente en la región constituye la principal limitación para trasladar estas conclusiones de la plausibilidad a la certeza, y define con claridad la agenda de investigación necesaria para dar el siguiente paso en este campo.

5. CONCLUSIONES

La presente revisión bibliográfica permitió analizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2026 sobre el efecto combinado de las micorrizas arbusculares y los ácidos húmicos en el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.). Los estudios revisados indican que ambos bioestimulantes, aplicados de forma individual o combinada, favorecen de manera consistente el crecimiento, la absorción de nutrientes y el rendimiento del cultivo, especialmente en suelos ácidos y con baja disponibilidad de fósforo, condiciones similares a las que caracterizan gran parte de la región amazónica.

La evidencia analizada muestra que la interacción entre micorrizas arbusculares y ácidos húmicos puede generar efectos aditivos o sinérgicos mediante mecanismos complementarios relacionados con el incremento de la exploración radicular, la mejora de la disponibilidad de nutrientes y la activación de procesos fisiológicos que favorecen el desarrollo vegetal. No obstante, el reducido número de investigaciones que evalúan simultáneamente ambos bioestimulantes y la heterogeneidad metodológica de los estudios limitan la posibilidad de establecer conclusiones definitivas sobre la magnitud de esta interacción.

Como principal contribución, esta revisión sistematiza la evidencia científica reciente sobre el uso combinado de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos en el cultivo de maíz, identificando las principales tendencias de investigación, los avances alcanzados y las brechas de conocimiento existentes. Entre estas destacan la ausencia de estudios realizados en condiciones amazónicas, la escasa evaluación de los efectos a largo plazo y la necesidad de estandarizar metodologías experimentales que permitan comparar resultados entre diferentes investigaciones.

En consecuencia, se recomienda que futuras investigaciones desarrollen ensayos de campo bajo condiciones edafoclimáticas representativas de la Amazonía, incorporando evaluaciones de largo plazo y protocolos experimentales estandarizados que permitan validar el potencial agronómico de la aplicación combinada de micorrizas arbusculares y ácidos húmicos como estrategia sostenible para el cultivo de maíz.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Campus Orellana, por el apoyo académico y el acceso a los recursos bibliográficos que hicieron posible el desarrollo de esta revisión bibliográfica. También agradecen a los docentes e investigadores que han contribuido al fortalecimiento de este trabajo a través de su liderazgo y contribuciones académicas. También agradecemos a los autores del estudio discutido cuyas contribuciones forman la base científica que apoyó el análisis y la síntesis de la evidencia presentada en esta revisión.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] N. Sarwar, "Response of hybrid maize to multiple soil organic amendments under sufficient or deficient soil zinc situation," Asian Journal of Agriculture and Biology, vol. 8, no. 1, pp. 38–43, Feb. 2020, doi: 10.35495/ajab.2019.07.332.

[2] V. Skliar, K. Kyrylchuk, I. Zubtsova, A. Novikova, and S. Yaroshchuk, "Application of biostimulants in agriculture: Effects on plant growth and yield," Scientific Horizons, vol. 27, no. 9, pp. 73–85, Aug. 2024, doi: 10.48077/scihor9.2024.73.

[3] Z. Qin et al., "Soil phosphorus availability modifies the relationship between AM fungal diversity and mycorrhizal benefits to maize in an agricultural soil," Soil Biol. Biochem., vol. 144, p. 107790, May 2020, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107790.

[4] L. P. Canellas, N. A. Canellas, F. Val, R. Spaccini, P. Mazzei, and F. L. Olivares, "Changes in Amino Acids Profile and Uptake on Maize Seedlings Treated with Protein Hydrolysates and Humic Substances," Nitrogen, vol. 5, no. 2, pp. 439–454, May 2024, doi: 10.3390/nitrogen5020028.

[5] L. P. Canellas, N. O. A. Canellas, L. E. S. da S. Irineu, F. L. Olivares, and A. Piccolo, "Plant chemical priming by humic acids," Chemical and Biological Technologies in Agriculture, vol. 7, no. 1, p. 12, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40538-020-00178-4.

[6] D. Savy, Y. Brostaux, V. Cozzolino, P. Delaplace, P. du Jardin, and A. Piccolo, "Quantitative Structure-Activity Relationship of Humic-Like Biostimulants Derived From Agro-Industrial Byproducts and Energy Crops," Front. Plant Sci., vol. 11, May 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00581.

[7] N. Valero, Y. Ustates, and M. Pantoja-Guerra, "Biostimulant activity of humic acids derived from goat manure vermicompost and lignite in relation to their structure and interaction with a PGPR strain under semiarid conditions," Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, vol. 17, no. 2, May 2023, doi: 10.17584/rcch.2023v17i2.15956.

[8] N. O. V. Valero, "Low rank coal as a soil amendment and early growth stimulator of maize," vol. 19, no. 2, pp. 84–102, 2024, [Online]. Available: https://www.scopus.com/pages/publications/85216857455?origin=resultslist

[9] C. Gao, A. M. El-Sawah, D. F. I. Ali, Y. Alhaj Hamoud, H. Shaghaleh, and M. S. Sheteiwy, "The Integration of Bio and Organic Fertilizers Improve Plant Growth, Grain Yield, Quality and Metabolism of Hybrid Maize (Zea mays L.)," Agronomy, vol. 10, no. 3, p. 319, Feb. 2020, doi: 10.3390/agronomy10030319.

[10] V. Cozzolino, H. Monda, D. Savy, V. Di Meo, G. Vinci, and K. Smalla, "Cooperation among phosphate-solubilizing bacteria, humic acids and arbuscular mycorrhizal fungi induces soil microbiome shifts and enhances plant nutrient uptake," Chemical and Biological Tech-

nologies in Agriculture, vol. 8, no. 1, p. 31, Jun. 2021, doi: 10.1186/s40538-021-00230-x.

[11] M. SEMBIRING, T. SABRINA, and M. MUKHLIS, "Effect of soil conditioner enriched with biofertilizers to improve soil fertility and maize (Zea mays L.) growth on andisols Sinabung area," Acta Agric. Slov., vol. 116, no. 2, Dec. 2020, doi: 10.14720/aas.2020.116.2.1322.

[12] R. Ouhaddou et al., "Investigation of the impact of dual inoculations of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria on drought tolerance of maize grown in a compost-amended field under Mediterranean conditions," Front. Microbiol., vol. 15, Oct. 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1432637.

[13] Y. Yuan et al., "Applying a combination of artificial humic acid and microbial agent to increase rhizosphere soil organic carbon content and maize yield," Plant Soil, vol. 518, no. 2, pp. 1089–1106, Jan. 2026, doi: 10.1007/s11104-025-08049-3.

[14] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," BMJ, p. n71, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[15] El Gabardi S. et al., "Effects of phospho-compost and mud from phosphate sludges combined or not with an endomycorrhizal inoculum on the improvement of the agronomic parameters of maize (Zea mays L.) plants," vol. 21, no. 35–36, pp. 65–80, 2020, [Online]. Available: https://www.scopus.com/pages/publications/85092926369?origin=resultslist

[16] A. Feilinezhad, M. Mirzaeiheydari, F. Babaei, A. Maleki, and M. Rostaminya, "The Effect of Tillage, Organic Matter and Mycorrhizal Fungi on Efficiency and Productivity Use of Nutrients in Maize," Commun. Soil Sci. Plant Anal., vol. 53, no. 20, pp. 2719–2733, Nov. 2022, doi: 10.1080/00103624.2022.2072869.

[17] F. Yao et al., "Addition of organic amendments derived from invasive apple snails alleviated soil acidification, improved soil nitrogen and phosphorus effectiveness, microbial growth and maize yield in South China," Environ. Technol. Innov., vol. 33, p. 103475, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eti.2023.103475.

[18] B. Zenebe, B. Dobo, and K. Woliy, "The Influence of Biochar, Organic and Inorganic Fertilizers, and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Maize Crop Performance Under Normal and Water-Stressed Conditions," Advances in Agriculture, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/4934523.

[19] T. Nurhidayati et al., "The Effect of Mycorrhiza and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Supplementation on Zea mays saccharata Sturt. Growth and Productivity Grown on Low Nutrients Soil," Nature Environment and Pollution Technology, vol. 23, no. 3, pp. 1449–1459, Sep. 2024, doi: 10.46488/NEPT.2024.v23i03.015.

[20] W. Astiko, M. T. Fauzi, L. E. Susilowati, L. Zulkifli, and Fahrurozi, "Improving Nitrogen Availability and Crop Productivity Using Bioameliorants in Maize–Soybean Intercropping on Suboptimal Land," Nitrogen, vol. 6, no. 4, p. 89, Oct. 2025, doi: 10.3390/nitrogen6040089.

[21] A. I. Raya-Hernández, P. F. Jaramillo-López, D. A. López-Carmona, T. Díaz, J. A. Carrera-Valtierra, and J. Larsen, "Field evidence for maize-mycorrhiza interactions in agroecosystems with low and high P soils under mineral and organic fertilization," Applied Soil Ecology, vol. 149, p. 103511, May 2020, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103511.

[22] V. Marrassini, L. Ercoli, R. Cardelli, V. Cantini, and E. Pellegrino, "Lack of complementary or synergistic benefits of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and organic amendments but functional differentiation among AMF species in a maize–wheat rotation," Science of The Total Environment, vol. 1012, p. 181292, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.181292.

[23] I. Kakabouki, A. Efthimiadou, A. Folina, C. Zisi, and S. Karydogianni, "Effect of different tomato pomace compost as organic fertilizer in sweet maize crop," Commun. Soil Sci. Plant Anal., vol. 51, no. 22, pp. 2858–2872, Dec. 2020, doi: 10.1080/00103624.2020.1853148.

[24] M. Rafique, I. Ortas, M. Rizwan, H. J. Chaudhary, A. R. Gurmani, and M. F. Hussain Munis, "Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (Zea mays L.) amended with microbes in texturally different soils," Chemosphere, vol. 238, p. 124710, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124710.

[25] A. TANWAR, A. SİNGH, A. AGGARWAL, E. JANGRA, and S. T. PİCHARDO, "Evaluation of municipal sewage sludge for Arbuscular mycorrhizal fungi inoculum production," EURASIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE (EJSS), vol. 10, no. 4, pp. 343–353, Oct. 2021, doi: 10.18393/ejss.972157.

[26] C. A. Lagos, T. Díaz, E. Saucedo, C. Arriagada, J. Larsen, and P. F. Jaramillo-López, "Soil contamination with phenanthrene induces maize mycorrhiza growth su-

ppression," Rhizosphere, vol. 18, p. 100340, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.rhisph.2021.100340.

[27] F. C. Andrade, F. Fernandes, A. Oliveira Júnior, A. B. L. Rondina, M. Hungria, and M. A. Nogueira, "Enrichment of organic compost with beneficial microorganisms and yield performance of corn and wheat," Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 25, no. 5, pp. 332–339, May 2021, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n5p332-339.

[28] A. Wolna-Maruwka et al., "The Effect of Biochar-Based Organic Amendments on the Structure of Soil Bacterial Community and Yield of Maize (Zea mays L.)," Agronomy, vol. 11, no. 7, p. 1286, Jun. 2021, doi: 10.3390/agronomy11071286.

[29] M. J. Salomon et al., "Evaluation of commercial composts and potting mixes and their ability to support arbuscular mycorrhizal fungi with maize (Zea mays) as host plant," Waste Management, vol. 134, pp. 187–196, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.018.

[30] B. Thapa and J. Mowrer, "Effects of Carbon Amendments, Tillage and Cover Cropping on Arbuscular Mycorrhizal Fungi Association and Root Architecture in Corn and Cotton Crop Sequence," Agronomy, vol. 12, no. 9, p. 2185, Sep. 2022, doi: 10.3390/agronomy12092185.

[31] F. M. El-maghraby, E. M. Shaker, M. Elbagory, A. E.-D. Omara, and T. H. Khalifa, "The Synergistic Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Compost Tea to Enhance Bacterial Community and Improve Crop Productivity under Saline–Sodic Condition," Plants, vol. 13, no. 5, p. 629, Feb. 2024, doi: 10.3390/plants13050629.

[32] F. Serrapica et al., "Sustainable Maize Forage Production: Effect of Organic Amendments Combined with Microbial Biofertilizers Across Different Soil Textures," Sustainability, vol. 17, no. 21, p. 9617, Oct. 2025, doi: 10.3390/su17219617.

[33] W. Dong et al., "Synergistic effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth: Insights into nutrient uptake and microbial community shifts," Ind. Crops Prod., vol. 239, p. 122467, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.122467.

[34] A. D. FATAYA, W. S. DEWI, H. HADIWIYONO, and V. R. CAHYANI, "Effects of mycorrhizal inoculum, organic inputs, and carbofuran on maize growth in Alfisol," International Journal of Tropical Drylands, vol. 10, no. 1, Apr. 2026, doi: 10.13057/tropdrylands/t100101.

[35] L. A. Ulhoa, A. L. Boiça Júnior, J. A. Davis, and M. J. Stout, "Influence of mycorrhizae and silicon on maize and soybean resistance and tolerance to Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae)," Journal of Insect Science, vol. 26, no. 2, Mar. 2026, doi: 10.1093/jisesa/ieag028.

[36] A. I. Abdo, E.-S. E. A. El-Sobky, and J. Zhang, "Optimizing maize yields using growth stimulants under the strategy of replacing chemicals with biological fertilizers," Front. Plant Sci., vol. 13, Nov. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1069624.

[37] J. Izquierdo, O. Arriagada, G. García-Pintos, R. Ortiz, M. García-Pintos, and M. García-Pintos, "Humic field biostimulation as a sustainable agricultural practice to increase yield of main grains: evidence from on-farm trials," Front. Plant Sci., vol. 16, Dec. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1709876.

[38] J. Song, B. Pi, J. Dai, Z. Nie, G. Yu, and W. Du, "Effects of humic acid on the growth and cadmium accumulation of maize (Zea mays L.) seedlings," Int. J. Phytoremediation, vol. 27, no. 7, pp. 888–895, Jun. 2025, doi: 10.1080/15226514.2025.2455483.

[39] J. F. Da Cunha Leme Filho et al., "An integrated plant nutrition system (IPNS) for corn in the Mid-Atlantic USA," J. Plant Nutr., vol. 44, no. 5, pp. 704–722, Mar. 2021, doi: 10.1080/01904167.2020.1849298.

[40] M. A. Baldotto, R. O. Melo, and L. B. Baldotto, "Initial development of maize in response to different periods of seed immersion in humic acid (HA)," Aust. J. Crop Sci., no. 15(10):2021, pp. 1259–1262, Oct. 2021, doi: 10.21475/ajcs.21.15.10.p3148.

[41] C. Savarese et al., "Bioactivity of two different humic materials and their combination on plants growth as a function of their molecular properties," Plant Soil, vol. 472, no. 1–2, pp. 509–526, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11104-021-05267-3.

[42] Ł. Sobiech, M. Grzanka, R. Idziak, and A. Blecharczyk, "The Effect of Post-Emergence Application of Biostimulants and Soil Amendments in Maize Cultivation on the Growth and Yield of Plants," Plants, vol. 14, no. 9, p. 1274, Apr. 2025, doi: 10.3390/plants14091274.

[43] C. da S. Dias et al., "Biostimulant seed priming with humic acid followed by drying: A sustainable technique to enhance early growth of maize," Aust. J. Crop Sci., p. 1158, Dec. 2025, doi: 10.21475/ajcs.25.19.12.p61.

[44] C. N. Sible, J. S. Fender, and F. E. Below, "Soil-applied carbon-based biostimulants differentially affect maize and soybean grain yield and quality," Agrosystems, Geosciences & Environment, vol. 8, no. 4, Dec. 2025, doi: 10.1002/agg2.70281.

[45] K. KARABAYEV, B. SULEIMENOV, Y. SONGULOV, U. AKHMURZIN, and A. SMANOV, "Integrated application of granular and liquid bioorganic fertilizers improves corn productivity and soil fertility in light chestnut soils," Cell Biology and Development, vol. 9, no. 1, Aug. 2025, doi: 10.13057/cellbioldev/v090105.

[46] W. Huo et al., "Efficient Co-hydrothermal conversion of corn straw and pig manure into nitrogen-enriched soluble humic acid fertilizer," J. Environ. Manage., vol. 408, p. 129976, May 2026, doi: 10.1016/j.jenvman.2026.129976.

[47] K. Kurniati et al., "Effects of agromineral and biostimulant applications on nutrient uptake in corn (Zea mays L.)," Journal of Ecological Engineering, vol. 27, no. 2, pp. 16–26, Feb. 2026, doi: 10.12911/22998993/210647.

[48] G. Saparov et al., "Integrated Assessment of Vermiculite Enriched with Humic Substances or Chlorella vulgaris: Soil Fertility, Maize Nutrition, and Microbial Indicators," Agriculture, vol. 16, no. 6, p. 712, Mar. 2026, doi: 10.3390/agriculture16060712.

[49] A. G. Oktem, "Foliar Application of Amino Acids Mitigate High-Temperature Stress and Improve Yield, Quality, and Physiological Responses of Maize," Int. J. Plant Prod., vol. 20, no. 3, p. 65, Sep. 2026, doi: 10.1007/s42106-026-00447-6.

[50] S. Symanczik, C. Lipp, P. Mäder, C. Thonar, and D. Kundel, "Limited effectiveness of selected bioeffectors combined with recycling phosphorus fertilizers for maize cultivation under Swiss farming conditions," Front. Plant Sci., vol. 14, Aug. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1239393.

[51] D. Qiao, A. Borundia, C. Cruz, and A. M. Mouazen, "Impacts of carbon-rich amendments and bio-stimulants in subsoil on fodder maize productivity," Field Crops Res., vol. 337, p. 110239, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.fcr.2025.110239.

[52] M. Ou-Zine, R. El Hilali, A. Haggoud, E. H. Achbani, and R. Bouamri, "Effects and Relationships of Compost Dose and Organic Additives on Compost Tea Properties, Efficacy Against Fusarium oxysporum and Potential Effect on Endomycorrhization and Growth of Zea mays L.," Waste Biomass Valorization, vol. 13, no. 11, pp. 4431–4445, Nov. 2022, doi: 10.1007/s12649-022-01795-w.

[53] T. Vujinović et al., "Biostimulant Action of Dissolved Humic Substances From a Conventionally and an Organically Managed Soil on Nitrate Acquisition in Maize Plants," Front. Plant Sci., vol. 10, Jan. 2020, doi: 10.3389/fpls.2019.01652.

[54] V. Santoro et al., "Phosphorus Acquisition Efficiency and Transcriptomic Changes in Maize Plants Treated with Two Lignohumates," Plants, vol. 12, no. 18, p. 3291, Sep. 2023, doi: 10.3390/plants12183291.

[55] V. R. Cahyani, N. Y. Azzahra, and R. Rosariastuti, "Evaluation of Arbuscular Mycorrhizal Cultures in Increasing Phosphorus Uptake and Maize Growth Compared to Chemical and Organic Fertilizers on an Andisol," AGRIVITA Journal of Agricultural Science, vol. 46, no. 3, pp. 439–457, Oct. 2024, doi: 10.17503/agrivita.v46i3.3867.

[56] Y. Wang et al., "Analysis of the molecular composition of humic substances and their effects on physiological metabolism in maize based on untargeted metabolomics," Front. Plant Sci., vol. 14, May 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1122621.

[57] F. Yang et al., "Artificial humic acid promotes growth of maize seedling under alkali conditions," Environmental Pollution, vol. 327, p. 121588, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121588.

[58] B. Li, D. Song, T. Guo, X. Xu, C. Ai, and W. Zhou, "Combined physiological and metabolomic analysis reveals the effects of different biostimulants on maize production and reproduction," Front. Plant Sci., vol. 13, Nov. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1062603.

[59] L. Archana Devi et al., "Exogenous Soil Drenching Supplementation of Fluvic Acid Enhances Growth Promotion in Maize (Zea mays L.)," Russian Journal of Plant Physiology, vol. 72, no. 6, p. 198, Dec. 2025, doi: 10.1134/S1021443725604239.

[60] M. S. Sheteiwy et al., "Sugar metabolism and metabolite profiling of maize grains are largely improved by the combination of arbuscular mycorrhizal fungi and humic acid," Ind. Crops Prod., vol. 234, p. 121546, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.121546.

[61] J. S. Bamboriya et al., "Monitoring the effect of integrated nutrient management practices on soil health in maize-based cropping system," Front. Sustain. Food Syst., vol. 7, Sep. 2023, doi: 10.3389/fsufs.2023.1242806.

[62] R. Ablimit et al., "Altering microbial community for improving soil properties and agricultural sustainability during a 10-year maize-green manure intercropping in Northwest China," J. Environ. Manage., vol. 321, p. 115859, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115859.

[63] A. C. Souza et al., "Acclimation with humic acids enhances maize and tomato tolerance to salinity," Chemical and Biological Technologies in Agriculture, vol. 8, no. 1, p. 40, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40538-021-00239-2.

[64] M. E. Abu-Ria, W. M. Shukry, S. A. Abo-Hamed, F. Ibraheem, and E. M. Elghareeb, "Differential Physiological Responses of Zea mays and Sorghum bicolor to Drought Stress: Insights into the Ameliorative Role of Humic Acid at the Reproductive and Yield Stages," J. Plant Growth Regul., vol. 44, no. 10, pp. 6061–6082, Oct. 2025, doi: 10.1007/s00344-025-11813-5.

[65] M. E. Abu-Ria, E. M. Elghareeb, W. M. Shukry, S. A. Abo-Hamed, and F. Ibraheem, "Mitigation of drought stress in maize and sorghum by humic acid: differential growth and physiological responses," BMC Plant Biol., vol. 24, no. 1, p. 514, Jun. 2024, doi: 10.1186/s12870-024-05184-4.

[66] E. A. Alsherif, O. Almaghrabi, A. M. Elazzazy, M. Abdel-Mawgoud, G. T. S. Beemster, and H. AbdElgawad, "Carbon nanoparticles improve the effect of compost and arbuscular mycorrhizal fungi in drought-stressed corn cultivation," Plant Physiology and Biochemistry, vol. 194, pp. 29–40, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.plaphy.2022.11.005.

[67] E. A. Alsherif et al., "How Carbon Nanoparticles, Arbuscular Mycorrhiza, and Compost Mitigate Drought Stress in Maize Plant: A Growth and Biochemical Study," Plants, vol. 11, no. 23, p. 3324, Dec. 2022, doi: 10.3390/plants11233324.

[68] R. Ouhaddou et al., "Enhancing Maize Productivity and Soil Health under Salt Stress through Physiological Adaptation and Metabolic Regulation Using Indigenous Biostimulants," Plants, vol. 12, no. 21, 2023, doi: 10.3390/plants12213703.

[69] J. L. A. Santos et al., "Alkaline extract from vermicompost reduced the stress promoted by As on maize plants and increase their phytoextraction capacity," Environmental Science and Pollution Research, vol. 29, no. 14, pp. 20864–20877, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17255-2.

[70] Q. Jia, J. Sun, Q. Gan, N.-N. Shi, and S. Fu, "Zea mays cultivation, biochar, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation influenced lead immobilization," Microbiol. Spectr., vol. 12, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.1128/spectrum.03427-23.

[71] F. Ahmadi, S. H. Sarghin, A. Siosemardeh, and W. Weisany, "Mitigating exogenous cobalt-induced stress in maize plants with biochar and arbuscular mycorrhizal fungi (Rhizophagus intraradices)," Acta Physiol. Plant., vol. 47, no. 9, p. 85, Sep. 2025, doi: 10.1007/s11738-025-03831-3.

[72] L. Ech-Chatir et al., "CO-INOCULATION Of COMPOST WITH ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AND ENDOPHYTIC BACTERIA TO ALLEVIATE THE ADVERSE IMPACT OF DROUGHT STRESS IN MAIZE," Pak. J. Bot., vol. 57, no. 4, pp. 1255–1271, 2025, doi: 10.30848/PJB2025-4(21).

[73] K. D. Alotaibi, "Interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi and organic amendments on maize growth under salinity stress," Front. Plant Sci., vol. 17, Mar. 2026, doi: 10.3389/fpls.2026.1638742.

[74] Y. Bouhia, M. Hafidi, Y. Ouhdouch, M. E. M. El Boukhari, Y. Zeroual, and K. Lyamlouli, "Effect of the co-application of olive waste-based compost and biochar on soil fertility and zea mays agrophysiological traits," International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, vol. 10, no. 2, pp. 111–127, 2021, doi: 10.30486/ijrowa.2021.1906342.1115.

[75] Q. Liu et al., "Impact of Particle Size on the Aerobic Decomposition and Fertilizer Efficiency of Corn Cobs: A Sustainable Waste-to-Resource Approach," Biology (Basel)., vol. 14, no. 11, p. 1610, Nov. 2025, doi: 10.3390/biology14111610.

[76] R. B. Guidinelle et al., "Impact of historical soil management on the interaction of plant-growth-promoting bacteria with maize (Zea mays L.)," Heliyon, vol. 10, no. 7, p. e28754, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28754.

[77] K. Othibeng et al., "A Metabolic Choreography of Maize Plants Treated with a Humic Substance-Based Biostimulant under Normal and Starved Conditions," Metabolites, vol. 11, no. 6, p. 403, Jun. 2021, doi: 10.3390/metabo11060403.

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 14/06/2026 · *Aceptado:* 16/08/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/r42kr037

EVALUACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL AIRE Y SUPERFICIES EN DIFERENTES ÁREAS DE CLÍNICAS VETERINARIAS

MICROBIOLOGICAL ASSESSMENT OF AIR AND SURFACES IN DIFFERENT AREAS OF VETERINARY CLINICS

[1] Anthony Josué Bravo Solórzano*	anthonybravo200104a@gmail.com
[1] Félix Agustín Quijije Carranza	felixagusquijije@outlook.com
[2] María Karolina López Rauschemberg	klopez@espam.edu.ec
[3] Manuel Patricio Lucas Basurto	manuel28.mplb@gmail.com

[1] Autor independiente·

[2] Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Carrera de Medicina Veterinaria, El Limón, Manabí, Ecuador·

[3] Maestrante en Medicina Veterinaria, mención Salud y Reproducción en Especies Productiva, Universidad Tecnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador·

E-mail: * anthonybravo200104a@gmail.com

RESUMEN

Las infecciones nosocomiales se han transformado en una preocupación de suma importancia en los servicios de atención de salud humanas y veterinarias. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad microbiológica del aire y superficies en las diferentes áreas de clínicas veterinarias. Se analizaron las áreas de recepción, consultorio y quirófano, la toma de las muestras de aire se efectuó por el método de sedimentación, en tanto las muestras de superficies fueron obtenidas por el método de hisopado. Posteriormente, las muestras fueron incubadas bajo condiciones adecuadas, tras lo cual se realizó al conteo de colonias. La identificación de bacterias se llevo a cabo mediante tinción de Gram, y la de hongos mediante tinción simple. Los resultados demostraron niveles de contaminación de intermedios a altos en el aire. En cuanto a las superficies, únicamente la mesa y la lámpara quirúrgica en el análisis para bacterias, así como la mesa de exploración y la lámpara quirúrgica en el análisis de hongos, revelaron niveles de contaminación dentro de los parámetros aceptables, conforme a los estándares microbiológicos propuestos. Las bacterias aisladas con mayor frecuencia fueron Gram positivas, mientras que, en el caso de los hongos, destacaron los géneros Fusarium spp. y Mucor spp. Por lo tanto, la mayoría de las áreas evaluadas presentaron niveles microbiológicos por encima de los estándares recomendados, evidenciándose además una importante diversidad de microorganismos.

Palabras clave: *Bacterias; contaminación; hongos; infecciones nosocomiales.*

ABSTRACT

Nosocomial infections have become a major concern in both human and veterinary healthcare settings he. objective of this study was to evaluate the microbiological quality of the air and surfaces in various areas of veterinary clinics. The reception area, examination room, and operating room were analyzed; air samples were collected using the sedimentation method, while surface samples were obtained using the swab method. The samples were then incubated under appropriate conditions, after which colony counts were performed. Bacteria were identified using Gram staining, and fungi were identified using simple staining. The results showed intermediate to high levels of contamination in the air. Regarding surfaces, only the operating table and the surgical light in the bacterial analysis, as well as the examination table and the surgical light in the fungal analysis, showed contamination levels within acceptable parameters, in accordance with the proposed microbiological standards. The most frequently isolated bacteria were Gram-positive, while, in the case of fungi, the genera Fusarium spp. and Mucor spp. were predominant. Consequently, most of the areas evaluated had microbiological levels above the recommended standards, and a significant diversity of microorganisms was also observed.

Keywords: *Bacteria; contamination; fungi; nosocomial infections.*

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos microorganismos poseen la habilidad de ingresar y reproducirse dentro de los tejidos del huésped, causando así una infección [1]. Aquellas infecciones que son adquiridas dentro de un hospital u otro establecimiento de atención de salud se las denomina infecciones nosocomiales (IN) [2]. Entre los microorganismos más relacionados con este tipo de infecciones se incluyen aquellas causadas por bacterias y hongos [3], los cuales son comúnmente resistentes a los medicamentos [4].

Los datos Veterinarios para este campo son limitados, sin embargo, en un estudio previo se reportó que el 28.3% de los principales pacientes: perros (Canis lupus familiaris) y gatos (Felis catus) de 4 hospitales Veterinarios presentaron al menos un caso de IN [5].

En 38 hospitales Universitarios Veterinarios (europeos y norteamericanos) se informaron al menos un brote de IN en el 82% de ellos, durante un periodo de los últimos 5 años [6]. En consecuencia, a pesar de que existe poca información de las IN en Medicina Veterinaria, estas constituyen una preocupación indiscutible.

Este tipo de infecciones pueden generar diferentes complicaciones en los pacientes veterinarios, entre las cuales pueden implicar una mayor estancia hospitalaria (con el consiguiente aumento de costos para el dueño de la mascota o la clínica), mayor mortalidad y transmisión de patógenos multirresistentes, cuyo alcance trasciende a los pacientes, abarcando también un riesgo para el personal o cualquier individuo en contacto con la clínica veterinaria [4, 7].

Estos microorganismos patógenos se pueden transmitir a través de herramientas de trabajo y superficies hospitalarias, pudiendo sobrevivir en dicho lugar durante varios días, semanas o incluso meses, aumentando la probabilidad de transmisión [8], asimismo se ha evidenciado que el aire dentro de una clínica puede albergar numerosos microorganismos, significando un peligro potencial para la salud [9].

Debido a la importancia de las infecciones nosocomiales y a la escasa información existente en el ámbito Veterinario, el propósito de este estudio es evaluar la calidad microbiológica del aire y superficies en las diferentes áreas de clínicas Veterinarias.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño y área de estudio

La presente investigacion se realizó mediante un estudio descriptivo, transversal. Se llevó a cabo en la parroquia Calceta, perteneciente al cantón Bolívar, en la provincia de Manabí, Ecuador.

Se seleccionó 3 clínicas Veterinarias las cuales comprendieron las áreas que se detallan a continuación: área de recepción (3), área de consultorio (3), área del quirófano (2).

2.2. Toma de muestra

Se seleccionaron muestras del aire en 2 lugares específicos, una se ubicó en la entrada del área y la otra en uno de sus extremos; para las muestras de superficies en la recepción, se analizó la perilla interna de la puerta, sillón y escritorio; respecto al área de consultorio se tomaron muestras de la balanza, mesa de exploración y estetoscopio; en el área del quirófano se evaluó la mesa quirúrgica, mesa Mayo y la lámpara quirúrgica.

El muestreo del aire se realizó mediante el método de sedimentación, en el cual las cajas Petri se colocaron a 1 m de altura del suelo y se mantuvieron abiertas durante 30 minutos, se emplearon cajas con agar nutritivo (BD DIFCO™) para el cultivo de bacterias y agar potato dextrosa (PDA) (BD DIFCO™) para el crecimiento de hongos.

Con la finalidad de recolectar las muestras de superficies se aplicó el método del hisopado, a través de un hisopo en 10 mL de agua peptonada (TM MEDIA ®) se tomaron muestras en superficies regulares utilizando un molde estéril de dimensiones 10 x 10 cm abarcando una superficie de 100 cm2, para superficies no uniformes, se recorrió con el hisopo la zona a muestrear.

2.3. Recuento de unidades formadoras de colonias (UFC)

Posterior al transporte de las muestras hacia el laboratorio, se comenzó a realizar las diluciones correspondientes para las muestras de superficies, de cada dilución se inoculó 0.1 mL sobre cajas Petri preparadas con medios de cultivo agar nutritivo y PDA

Se procedió a incubar las cajas de Petri que contenían agar nutritivo a una temperatura de 37°C durante 24 horas, mientras las cajas Petri que contenían PDA fue-

ron incubadas a temperatura ambiente durante 120 horas. Posteriormente, se procedió al conteo de colonias, cuyos resultados se representaron en UFC/m3 de aire y UFC/cm2 para las superficies.

2.4. Identificación de microorganismos

Después de realizar el conteo, se eligieron colonias de interés en función de características como morfología, tamaño, pigmentación, entre otros. A continuación, se realizó la tinción de Gram para identificar las bacterias y la tinción simple para los hongos.

2.5. Análisis de datos

Se hizo uso de la estadística descriptiva para la tabulación de los datos derivados del análisis microbiológico de las diferentes áreas de muestreo, se calculó el promedio y la desviación estándar (SD) de UFC y la frecuencia de los diferentes microorganismos, mediante el programa Microsoft Excel (2019).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Recuento total de bacterias y hongos en el aire

Los valores de los recuentos bacterianos y fúngicos del aire en las áreas de recepción, consultorio y quirófano se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Recuento de bacterias y hongos (Promedio ± SD) en el aire de las distintas áreas de clínicas veterinarias.*

Áreas	Bacterias (UFC/m^3)	Hongos (UFC/m^3)
Área de recepción	1.613,57 ± 987,04	421,41 ± 126,49
Área de consultorio	1.005,45 ± 304,19	338,78 ± 48,06
Área de quirófano	1.110,44 ± 780,34	553,59 ± 196,62

La Organización Mundial de la Salud (OMS) indica límites referenciales para el recuento bacteriano en el aire, expresados en UFC/m3 para locales no industriales [10]. Al comparar estos estándares con los valores promedios obtenidos del conteo bacteriano en el presente estudio, se determina que existe un elevado nivel de contaminación en todas las áreas analizadas dentro de las clínicas veterinarias.

Se han informado concentraciones de bacterias entre 256 a 1.123 UFC/m3 en un hospital Veterinario de Krakow (Polonia) [11]. Al evaluar el promedio de estos datos y compararlo con los estándares de la OMS, se considera que este hospital presente una carga bacteriana alta, de manera similar a lo observado en este estudio.

Adicionalmente, se han documentado valores promedio de 226,9 UFC/m3 en clínicas Veterinarias ubicadas en el campo y valores promedio de 2.121,80 UFC/m3 en clínicas urbanas [12]. Esta observación indica una elevada carga de bacterias en clínicas urbanas, lo cual coincide con los resultados obtenidos en las clínicas veterinarios analizadas en este estudio.

En relación con los hongos en el aire, la OMS también establece niveles de contaminación para locales no industriales [10]. De acuerdo con estas pautas, el área de recepción y consultorio en las clínicas veterinarias analizadas tienen una contaminación intermedia, mientras que el área de quirófano alcanzó un nivel de contaminación alto.

Este elevado nivel de hongos en el quirófano puede atribuirse a varios factores, como la alta presencia de personas y animales en esa área, así como a la prolongada ocupación y a la clase de intervenciones quirúrgicas que se efectúan [13].

Se han evidenciado en distintos entornos veterinarios una variabilidad en la contaminación por hongos en el aire. En el interior de un hospital veterinario en Krakow (Poland), la carga de hongos varió de 1.052 UFC/m3 a 2.739 UFC/m3 [14]. En otra investigación realizada en tres instalaciones veterinarias en Taiwán se observaron concentraciones fúngicas de 635,6 UFC/m3, 423,6 UFC/m3 y 1.554,7 UFC/m3 [15]. Mientras que, en un establecimiento veterinario ubicado en Lisboa (Portugal), se presentaron concentraciones entre 88 y 504 UFC/m3 [16].

Las diferencias en la cantidad de hongos y bacterias presentes en el aire en las distintas clínicas humanas o veterinarias podrían deberse a los parámetros del ambiente (temperatura y humedad relativa), aire acondicionado, cantidad de personas y mascotas presentes, la amplitud del espacio, la distribución arquitectónica de la clínica, las diferencias en los intervalos de desinfección y el tipo de desinfectante utilizado [3, 9, 12, 17, 18].

3.2. Recuento total de bacterias y hongos en las superficies

Las cargas microbiológicas oscilaron entre 0 y 7,87 x 10^3 UFC/cm^2, evidenciando variaciones en los niveles de contaminación entre las diferentes superficies analizadas, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. *Recuento de bacterias y hongos (Promedio ± SD) en las superficies de las distintas áreas de clínicas veterinarias.*

Áreas	Superficies	Bacterias (UFC/cm²)	Hongos (UFC/cm²)
Área de recepción	Perilla de la puerta	$1{,}90 \times 10^{3} \pm 3{,}29 \times 10^{3}$	$2{,}89 \times 10^{2} \pm 4{,}57 \times 10^{2}$
	Sillón	$7{,}87 \times 10^{3} \pm 1{,}36 \times 10^{4}$	$4{,}33 \times 10^{1} \pm 6{,}66 \times 10^{1}$
Área de consultorio	Escritorio	$3{,}6 \times 10^{2} \pm 5{,}72 \times 10^{2}$	$3{,}67 \times 10^{1} \pm 4{,}04 \times 10^{1}$
	Balanza	$5{,}2 \times 10^{2} \pm 4{,}25 \times 10^{2}$	$4{,}67 \times 10^{1} \pm 4{,}16 \times 10^{1}$
	Mesa de exploración	$2{,}33 \times 10^{1} \pm 4{,}04 \times 10^{1}$	Ausencia
	Estetoscopio	$4{,}78 \times 10^{2} \pm 4{,}97 \times 10^{2}$	$4{,}51 \times 10^{2} \pm 5{,}30 \times 10^{2}$
Área de quirófano	Mesa quirúrgica	Ausencia	$4 \times 10^{1} \pm 2{,}83 \times 10^{1}$
	Mesa Mayo	$9{,}5 \times 10^{1} \pm 1{,}34 \times 10^{2}$	$4 \times 10^{1} \pm 4{,}24 \times 10^{1}$
	Lámpara quirúrgica	$2{,}55 \times 10^{-1} \pm 3{,}61 \times 10^{-1}$	Ausencia

En lo referente a las superficies, se han propuesto estándares microbiológicos aceptables para superficies hospitalarias, siendo <2,5 UFC/cm2 el indicador de higiene más ampliamente aceptado [19, 20, 21]. Utilizando este límite de contaminación, únicamente la mesa y la lámpara quirúrgicas en las muestras bacterianas, y tanto la mesa de exploración como la lámpara quirúrgica en las muestras fúngicas, registraron niveles aceptables de contaminación.

Por el contrario, la perilla de la puerta se identificó como una de las que presento mayor contaminación de microorganismos. Este hallazgo coincide con investigaciones realizadas en entornos hospitalarios Humanos [22] y Veterinarios [23], donde también se registró una alta contaminación en las perillas de las puertas. Del mismo modo se evidenció una notable carga microbiana en estetoscopios, sillas utilizadas por los clientes y balanzas, resultados que coinciden con investigaciones anteriores [23, 24, 25].

En las clínicas, diversas superficies pueden contaminarse durante las actividades del personal, ya que muchas de ellas entran en contacto directo con los pacientes durante la consulta o el examen físico, y con frecuencia no se aplica un procedimiento de desinfección adecuado luego de cada uso [23, 26, 27], esta deficiencia en las prácticas de higiene podría justificar la elevada presencia de microorganismos detectada en los estetoscopios y balanzas examinadas en este estudio. Igualmente, una gran cantidad de superficies son tocadas por los clientes y a menudo suelen ser ignoradas durante la limpieza y desinfección, convirtiéndose así en focos de infección [23], lo cual podría estar relacionado con los niveles altos de contaminación registrados en la perilla de la puerta y en las sillas de las clínicas analizadas.

3.3. Identificación de bacterias y hongos

En la Tabla 3 se observa el predominio de bacterias Gram positivas tanto en el aire (87%) como en las superficies (94%), mientras que las Gram negativas se presentaron en menor proporción en ambos tipos de muestra.

Tabla 3. *Frecuencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas en el aire y superficies de clínicas veterinarias.*

Tipo de muestra	Gram positivas	Gram negativas
Aire	87%	13%
Superficies	94%	6%

Estos resultados obtenidos en este estudio coinciden con los observados en una clínica Veterinaria ubicada en Antioquia (Colombia), donde se registró una mayor frecuencia de Gram positivas con un 53% [28]. Asimismo, una investigación en varios quirófanos Veterinarios en Sudáfrica mostró un aislamiento significativamente mayor de Gram positivas con un 81,31% [29]. De igual manera, en distintas clínicas Veterinarias de las ciudades de Chernivtsi y Kolomyia (Ucrania), se evidenció una tasa de aislamiento del 100% para algunos géneros pertenecientes a bacterias Gram positivas [30].

La elevada predominancia de bacterias Gram positivas puede atribuirse a la estructura de su pared celular, la cual presenta una capa abundante de peptidoglicano. Esta característica le confiere una mayor capacidad de soportar la desecación [31]; asimismo, ayuda disminuir la entrada de toxinas, actuando como un elemento de protección y contribuyendo a su supervivencia en diferentes ambientes [32].

En la Tabla 4 podemos observar la frecuencia de los géneros de hongos identificados en el aire y superficies, destacándose el Fusarium spp. y Mucor spp. respectivamente.

Tabla 4. *Frecuencia de los géneros de hongos en el aire y superficies de clínicas veterinarias.*

Géneros	Aire	Superficies
Fusarium spp.	27%	16%
Mucor spp.	25%	47%
Candida spp.	17%	21%
Penicillium spp.	15%	5%
Aspergillus spp.	10%	5%
Paecilomyces spp.	4%	5%
Trichoderma spp.	2%	Ausencia

Entre los hongos detectados, el género Fusarium spp. se estableció como el de mayor presencia en las muestras de aire. Hallazgos parecidos se reportaron en un hospital veterinario, donde este género presentó una alta incidencia [33]. De manera similar, en una investigación realizada en dos hospitales para humanos, Fusarium spp. tuvo la mayor prevalente en el aire [34]. En relación con las muestras de superficie revelaron una mayor presencia del género Mucor spp. Este hallazgo se reflejó en varios hospitales humanos, donde Mucor spp. fue uno de los hongos más frecuentes en las superficies [35].

La alta frecuencia de estos géneros de hongos se debe a su ubicuidad, facilitada por diversos factores, entre estos se incluyen la facilidad de crecimiento, la capacidad de adaptarse a situaciones de estrés y la elevada producción de esporas, que se propagan con facilidad, contribuyen a una mayor dispersión en el entorno [36, 37, 38, 39, 40].

5. CONCLUSIONES

La mayoría de las áreas de las clínicas veterinarias analizadas en esta investigación presentaron cargas bacterianas y fúngicas tanto en el aire como en las superficies que no cumplen con los estándares microbiológicos propuestos. En lo referente con los microorganismos encontrados, predominan las bacterias Gram positivas y, dentro de los hongos, los géneros Fusarium spp. y Mucor spp.

Varios factores pueden favorecer una elevada concentración de microorganismos en clínicas veterinarias. Por consiguiente, se recomienda para futuras investigaciones evaluar el papel que desempeña la temperatura y humedad relativa del ambiente, así como las prácticas de desinfección sobre la presencia de microorganismos en estos entornos.

6. AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no manifiestan conflictos de interés.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Troncoso T, Fischer W, Pardo C, Urrutia V, Sánchez L. Identificación y sensibilidad antimicrobiana de bacterias potencialmente responsables de infecciones nosocomiales en Medicina Veterinaria. Rev. Med. Vet.. [Internet]. 2020; (40): 85-90. https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss40.8

2. Betancourt B, Culay P, Betancourt R. Comportamiento de las infecciones nosocomiales en una unidad de cuidados intensivos. Rev. Cub. Med. Int. Emerg. [Internet]. 2021 [citado 5 abril 2025]; 20(2):e768. Disponible en: https://revmie.sld.cu/index.php/mie/article/view/768

3. Jeong S, Kang Y, Hwang Y, Yoo S, Jang H, Oh H, Kang J, Chang D; Na K; Kim G. Evaluation of Airborne Bacteria and Fungi in Surgical Areas at the Animal Hospital. J Vet Clin. [Internet]. 2016; 34(2): 76-81. https://doi.org/10.17555/jvc.2017.04.34.2.76

4. Stull J, Weese S. Hospital-Associated Infections in Small Animal Practice. Vet Clin North Am Small Anim Pract. [Internet]. 2015; 45(2): 217-233. https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2014.11.009

5. Ruple-Czerniak A, Aceto H, Bender J, Paradis M, Shaw S, Van Metre D, Weese J, Wilson D, Wilson J, Morley P. Using syndromic surveillance to estimate baseline rates for healthcare-associated infections in critical care units of small animal referral hospitals. J. Vet . Intern. Med. [Internet]. 2013; 27(6): 1392-1399. https://doi.org/10.1111/jvim.12190

6. Benedict K, Morley P, Van Metre D. Characteristics of biosecurity and infection control programs at veterinary teaching hospitals. J. Am. Vet. Med. Assoc. [Internet]. 2008; 233(5): 767-773. https://doi.org/10.2460/javma.233.5.767

7. Keck N, Dunie A, Dazas M, Hirchaud E, Laurence S, Gervais B, Madec J; Haenni M. Long-lasting nosocomial persistence of chlorhexidine-resistant Serratia marcescens in a veterinary hospital. Vet. Microbiol. [Internet]. 2020; 245:108686. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2020.108686

8. Plasencia N, Zegarra C, Failoc V, Díaz C. Aislamiento microbiológico de superficies inanimadas en contacto con pacientes en un hospital peruano. Infectio. [Internet]. 2020; 26(1): 67-72. https://doi.org/10.22354/in.v26i1.996

9. Ashuro Z, Diriba K, Afework A, Washo G, Areba A, Kanno G, Hareru H, Kaso A, Tesfu M. Assessment of Microbiological Quality of Indoor Air at Different Hospital Sites of Dilla University: A Cross-Sectional Study. Environmental Health Insights. [Internet]. 2022; 16. https://doi.org/10.1177/11786302221100047

10. Tinoco J, Carhuaz M, Flores D, Alvarez J. Determinación del crecimiento microbiológico por factores ambientales y su repercusión en la salud de la comunidad estudiantil en la biblioteca de la Universidad Peruana Unión. Rev. Investig. Ci. Téc. y Desar. [Internet]. 2016 [citado 11 abril 2025]; 2(1):rictd.v2i1.629. Disponible en: https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/629

11. Bulski K, Fraczek K, Cendrowska A, Chmiel M. Bacteriological Air Quality at Animal Veterinary Practice. Rocz. Ochr. Sr. [Internet]. 2019 [citado 23 abril 2025]; 21:841-854. Disponible en: https://ros.edu.pl/index.php/pl/?view=article&id=753:051-ros-v21-r2019&catid=52

12. Sitkowska J, Sitkowska W, Sitkowski L, Lutnicki K, Adamek L, Wilkolek P. Seasonal microbiological quality of air in veterinary practices in Poland. Ann. Agric. Environ. Med. [Internet]. 2015; 22(4):614-624. https://doi.org/10.5604/12321966.1185763

13. Mosalaei S, Amiri H, Rafiee A, Abbasi A, Baghani A, Hoseini M. Assessment of fungal bioaerosols and particulate matter characteristics in indoor and outdoor air of veterinary clinics. J. Environ. Health Sc.i Eng. [Internet]. 2021; 19(2):1773-1780. https://doi.org/10.1007%2Fs40201-021-00732-8

14. Bulski K; Fraczek, K. Mycological Air Quality at Animal Veterinary Practice. Rocz. Ochr. Sr. [Internet]. 2021; 23:168-179. https://doi.org/10.54740/ros.2021.011

15. Chen C, Liu B, Hsu C, Liu C, Liao A, Chou C, Lin C. Bioaerosol investigaction in three veterinary teaching hospitals in Taiwan. Taiwan Vet. J. [Internet]. 2017; 43(1):39-45. https://doi.org/10.1142/S1682648515500353

16. Viegas C, Monteiro A, Ribeiro E, Caetano L, Carolino E, Assunção R, Viegas S. Organic dust exposure in veterinary clinics: a case study of a small-animal practice in Portugal. Arh. Hig. Rada Toksikol. [Internet]. 2018; 69(4):309–316. https://doi.org/10.2478/aiht-2018-69-3171

17. Izzeddin N, Rodríguez G, Medina L, González L. Evaluación microbiológica de aire y superficies en quirófano de un centro de salud público. Salus. [Internet]. 2017 [citado 14 de mayo 2025]; 21(3):18-23. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=375955679005

18. Giotto C, Koprovski N, Souza T, Barros R, Starikoff K. Microbiological contamination in a university veterinary hospital. Cienc. Rural. [Internet]. 2022; 52(8):e20210475. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210475

19. Claro T, O'Reilly M, Daniels S, Humphreys H. Surface microbial contamination in hospitals: A pilot study on methods of sampling and the use of proposed microbiologic standards. Am. J. Infect. Control. [Internet]. 2015; 43(9):1000-1002. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.05.009

20. Ho Y, Wang L, Jiang H, Chang C, Hsieh C, Chang D, Tu H, Chiu T, Chao H, Tseng C. Use of a Sampling Area-Adjusted Adenosine Triphosphate Bioluminescence Assay Based on Digital Image Quantification to Assess the Cleanliness of Hospital Surfaces. Int. J. Environ. Res. Public. Health. [Internet]. 2016; 13(6):576. https://doi.org/10.3390/ijerph13060576

21. Smith J, Adams C, King M, Noakes C, Robertson C, Dancer S. Is there an association between airborne and surface microbes in the critical care environment?. J Hosp Infect. [Internet]. 2018; 100(3):e123–e129. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2018.04.003

22. Bhatta D, Hamal D, Shrestha R. Subramanya S, Baral N, Singh R, Nayak N, Gokhale S. Bacterial contamination of frequently touched objects in a tertiary care hospital of Pokhara, Nepal: how safe are our hands?. Antimicrob Resist Infect Control. [Internet]. 2018; 7:97 https://doi.org/10.1186/s13756-018-0385-2

23. Akwuobu C, Ngbede E, Mamfe L, Ezenduka E, Chah K. Veterinary clinic surfaces as reservoirs of multi-drug- and biocide-resistant Gram-negative bacteria. Access Microbiol. [Internet]. 2021; 3(11):000277. https://doi.org/10.1099/acmi.0.000277

24. Souza E, Oliveira R, Silva J, Mota R, Pinheiro, J, Waterloo M, do Monte M, da Fonseca A. Microbiological evaluation of stethoscopes used in the clinical routine of Veterinarians in the Metropolitan Region of Recife, Pernambuco, Brazil. RSD. [Internet]. 2022; 11(8):e44611830394. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30394

25. Alves R, Garino F, Pereira A. Assessment of bacterial contamination in the sectors of Clinical Medicine and Surgery Small Animal Veterinary Hospital, UFCG, PB. J Vet Med. [Internet]. 2015 [citado 4 junio 2025]; 37(2):173-177. Disponible en: https://bjvm.org.br/BJVM/article/view/369

26. Adhikari S, Adhikaree N, Paudel K, Nepal R, Poudel B, Giri S, Khadka S, Khawas S, Sapkota S, Regmi R, Rijal K. Bacterial Assessment of Stethoscopes Used by Healthcare Workers at a Tertiary Care Government Hospital in Bharatpur, Nepal. Diseases. [Internet]. 2023; 11(2):55. https://doi.org/10.3390/diseases11020055

27. Mir M, Ashraf M, Tripathi V, Mir B. Isolation, characterization and prevention of various microbial strains in NIC unit and PIC unit. Sci Rep. [Internet]. 2021; 11(1):647. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79364-1

28. Arroyave E, Uribe-Buriticá J, Granados-Acevedo S, Gutierrez L, Arismendi L, Vidal J, Londoño A. Aislamiento e identificación de bacterias con potencial nosocomial procedentes de ambientes y superficies de una clínica veterinaria Universitaria del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Antioquia-Colombia. Infectio. [Internet]. 2019; 23(3):227-233 https://doi.org/10.22354/in.v23i3.785

29. van der Merwe C, Naidoo V. Airborne bacteria in veterinary surgical theatres in South Africa. J S Afr Vet Assoc. [Internet]. 2023 [citado 13 junio 2025]; 94(1):130-144. Disponible en: https://jsava.co.za/index.php/jsava/article/view/535

30. Mocherniuk M, Kukhtyn M, Horiuk Y, Horiuk V, Tsvigun O, Tokarchuk T. Microflora of boxes for holding veterinary patients in clinics. Regul Mech Biosyst. [Internet]. 2022; 13(3): 257-264. https://doi.org/10.15421/022233

31. Atalay Y, Mengistie E, Tolcha A, Birhan B, Asmare G, Gebeyehu N, Gelaw K. Indoor air bacterial load and antibiotic susceptibility pattern of isolates at Adare General Hospital in Hawassa, Ethiopia. Front Public Health. [Internet]. 2023; 11:1194850. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1194850

32. Parvin F, Rahman M, Deva A, Vickery K, Hu H. Staphylococcus aureus Cell Wall Phenotypic Changes Associated with Biofilm Maturation and Water Availability: A Key Contributing Factor for Chlorine Resistance. Int J Mol Sci. [Internet]. 2023; 24(5):4983. https://doi.org/10.3390/ijms24054983

33. Kossakowski T, Steanin J, Costa R, dos Santos M, Kozusny D, Rodrigues, D. Pesquisa de fungos filamentosos em ambiente Hospitalar veterinário. Rev Soc Ven Microbiol. [Internet]. 2019 [citado 25 junio 2025]; 39(1,2):41-46. Disponible en: http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_vm/article/view/19254

34. Maldonado-Vega M, Peña-Cabriales J, De los Santos S, Castellanos-Arévalo A, Camarena-Pozos D, Árevalo-Rivas B, Valdés-Santiago L, Hernández-Valadez L, Guzmán de Peña D. Bioaerosoles y evaluación de la calidad del aire en dos centros hospitalarios ubicados en León, Guanaguato, México. Rev Int Contam Ambie. [Internet]. 2014 [citado 3 julio 2025]; 30(4):351-363. Disponible en: https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/45558

35. Ghazanfari M, Yazdani C, Keikha N, Kholoujini M, Kermani F, Nasirzadeh Y, Roohi B, Minooeianhaghighi M, Salari B, Jeddi S, Didehdar M, Shokri A, Seyahooei S, Aslani N, Nazeri M, Ghojoghi A, Amirizad K, Azish M, Nosratabadi M, Zakerian M, Hedayati S, Hatamipour H, Abastabar M, Haghani I, Hedayati M. Indoor environment assessment of special wards of educational hospitals for the detection of fungal contamination sources: A multi-center study (2019-2021). Curr Med Mycol. [Internet]. 2022; 8(4):1–8. https://doi.org/10.32598/CMM.2023.1370

36. Ghosh A, Singh R, Reddy S, Singh S, Rudramurthy S, Kaur H, Choudhary H, Chakrabarti A. Evaluation of environmental Mucorales contamination in and around the residence of COVID-19-associated mucormycosis patients. Front Cell Infect Microbiol. [Internet]. 2022; 12:953750. https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.953750

37. Ajmal M, Hussain A, Ali A, Chen H, Lin H. Strategies for Controlling the Sporulation in Fusarium spp. J Fungi. [Internet]. 2023; 9(1):10. https://doi.org/10.3390/jof9010010

38. Hurdeal V, Gentekaki E, Hyde K, Nguyen T, Lee H. Novel Mucor species (Mucoromycetes, Mucoraceae) from northern Thailand. MycoKeys. [Internet]. 2021; 84:57-78. https://doi.org/10.3897/mycokeys.84.71530

39. Nicolás F, Murcia L, Navarro E, Navarro-Mendoza M, Pérez-Arques C, Garre V. Mucorales Species and Macrophages. J Fungi. [Internet]. 2020; 6(2):94. https://doi.org/10.3390/jof6020094

40. Jangir P, Mehra N, Sharma K, Singh N, Rani M, Kapoor R. Secreted in Xylem Genes: Drivers of Host Adaptation in Fusarium oxysporum. Front Plant Sci. [Internet]. 2021; 12:628611. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.628611

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias
ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 15/08/2026 · *Aceptado:* 13/09/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/90rsph85

EVALUACIÓN DE LA ESTERASA PROSTÁTICA ESPECÍFICA CANINA (CPSE) Y EL VOLUMEN ECOGRÁFICO PROSTÁTICO POST-ORQUIECTOMÍA EN PERROS CON HIPERPLASIA PROSTÁTICA BENIGNA SUBCLINICA

EVALUATION OF CANINE PROSTATE-SPECIFIC ESTERASE (CPSE) AND PROSTATIC ULTRASOUND VOLUME POST-ORCHIECTOMY IN DOGS WITH SUBCLINICAL BENIGN PROSTATIC HYPERPLASIA

[1, 2] Antonio Murillo*	antoniomurillovet@gmail.com
[1] Milena Martino	carguello@espoch.edu.ec

[1,] Clinicia Veterinaria Martino, Reparto di Medicina Interna, Latina, Italia.
[2] Società Cooperativa Agricola Circe, Dipartimento di Ricerca e Sviluppo, Latina, Italia.

E-mail: * antoniomurillovet@gmail.com

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue cuantificar los cambios intraindividuales de la concentración sérica de esterasa prostática específica canina (CPSE) y del volumen prostático (VP) a los 10, 30 y 90 días posteriores al procedimiento quirúrgico de orquiectomía, respecto a los valores basales previos. Se preparó un estudio longitudinal retrospectivo de 14 perros machos enteros seleccionados a partir de una cohorte de un estudio previo de los autores [1], con criterios de inclusión de CPSE basal ≥70 ng/mL y hallazgos clínico-ecográficos compatibles con hiperplasia prostática benigna. Se analizaron mediciones pareadas en T0 (valor basal) y a los 10, 30 y 90 días postquirúrgicos. Los 14 perros completaron las cuatro evaluaciones temporales. La CPSE disminuyó de una mediana de 225,0 ng/mL (RIC 141,3–340,0) en T0, a 18,8 ng/mL (9,3–31,9) en D10, 16,2 ng/mL (6,9–22,0) en D30 y 10,4 ng/mL (8,0–18,2) en D90 (χ^2=33,0; p<0,001; W=0,786). El VP disminuyó de 26,2 cm^3 (17,9–32,5) en T0 a 14,4 cm^3 (10,1–17,7) en D10, 10,1 cm^3 (7,1–13,0) en D30 y 7,2 cm^3 (5,5–9,9) en D90, respectivamente (χ^2=42,0; p<0,001; W=1,000). En referencia a T0, la razón de medias geométricas en D10 fue 0,080 (IC95% 0,071–0,090) para CPSE y 0,552 (0,532–0,574) para VP; en D90 fue 0,049 (0,042–0,057) y 0,293 (0,279–0,307) respectivamente. Todas las comparaciones con T0 fueron significativas (p<0,001). La asociación intraindividual entre CPSE y VP fue alta (r=0,921; IC95% 0,858–0,957; p<0,001). La castración se asoció con una disminución rápida y uniforme de la actividad secretora prostática, reflejada por los valores CPSE y con una involución anatómica más gradual que continuó hasta D90. La CPSE podría ser útil como marcador temprano de respuesta a la actividad prostática, mientras que la ecografía aporta información complementaria sobre la regresión morfológica. Estos resultados requieren validación prospectiva y no establecen por sí solos umbrales diagnósticos después de un procedimiento de orquiectomía.

Palabras clave: *CPSE; volumen prostático; hiperplasia prostática benigna; perro; orquiectomía; ultrasonografía.*

ABSTRACT

The aim of this study was to quantify the intra-individual changes in serum canine prostate-specific esterase (CPSE) concentration and prostatic volume (PV) at 10, 30, and 90 days following the surgical procedure of orchiectomy, relative to previous baseline values. A retrospective longitudinal study was conducted on 14 intact male dogs selected from a cohort of a previous study by the authors [1], with inclusion criteria of baseline CPSE ≥70 ng/mL and clinical-ultrasonographic findings compatible with benign prostatic hyperplasia. Paired measurements at T0 (baseline value) and at 10, 30, and 90 postoperative days were analyzed. All 14 dogs completed the four temporal evaluations. CPSE decreased from a median of 225.0 ng/mL (IQR 141.3–340.0) at T0, to 18.8 ng/mL (9.3–31.9) at D10, 16.2 ng/mL (6.9–22.0) at D30, and 10.4 ng/mL (8.0–18.2) at D90 (χ^2=33.0; p<0.001; W=0.786). PV decreased from 26.2 cm^3 (17.9–32.5) at T0 to 14.4 cm^3 (10.1–17.7) at D10, 10.1 cm^3 (7.1–13.0) at D30, and 7.2 cm^3 (5.5–9.9) at D90, respectively (χ^2=42.0; p<0.001; W=1.000). Compared to T0, the geometric mean ratio at D10 was 0.080 (95% CI 0.071–0.090) for CPSE and 0.552 (0.532–0.574) for PV; at D90, it was 0.049 (0.042–0.057) and 0.293 (0.279–0.307), respectively. All comparisons with T0 were significant (p<0.001). The intra-individual association between CPSE and

PV was strong (r=0.921; 95% CI 0.858–0.957; p<0.001). Castration was associated with a rapid and uniform decrease in prostatic secretory activity, as reflected by CPSE values, and a more gradual anatomical involution that continued until D90. CPSE could be useful as an early marker of response in prostatic activity, while ultrasonography provides complementary information on morphological regression. These results require prospective validation and do not, on their own, establish diagnostic thresholds after an orchiectomy procedure.

Keywords: *CPSE; prostatic volume; benign prostatic hyperplasia; dog; orchiectomy; ultrasonography.*

1. INTRODUCCIÓN

La hiperplasia prostática benigna (HPB) representa la afección prostática de mayor prevalencia en el perro macho entero de edad avanzada, estando estrechamente vinculada a la exposición prolongada y el estímulo continuo de los andrógenos testiculares circulantes [1-3]. A medida que avanza la progresión e hipertrofia glandular, el cuadro clínico puede manifestarse a través de descargas uretrales hemorrágicas, hematuria, signología del tracto urinario inferior como disuria, o bien compromiso gastrointestinal manifestado por tenesmo y disquecia, además de disfunciones reproductivas [4-6]. No obstante, una proporción considerable de pacientes puede desarrollar la enfermedad de forma subclínica durante periodos prolongados, lo que dificulta su detección temprana en la práctica veterinaria habitual [1,6,7].

Para su capacidad diagnóstica, la ultrasonografía abdominal bidimensional constituye el pilar central que permite cuantificar el volumen, evaluar la simetría y caracterizar la morfología del parénquima [8-10]. Sin embargo, las alteraciones ecográficas estructurales presentan un desafío clínico importante, ya que sus hallazgos morfológicos suelen solaparse con otras entidades patológicas [9,10]. Esta falta de especificidad impide, en ocasiones, una diferenciación concluyente entre la HPB, procesos infecciosos complejos como la prostatitis, estructuras quísticas intraparenquimatosas o neoplasias prostáticas primarias [1,3,11,12].

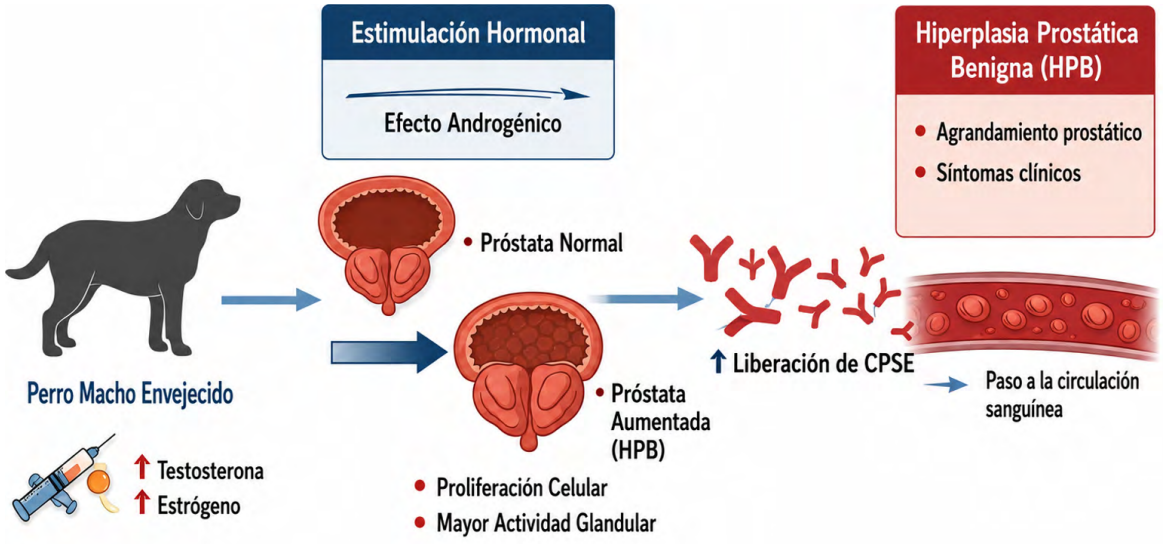


Figura 1. *Mecanismo de CPSE y HPB en el perro. El estímulo androgénico crónico de la dihidrotestosterona, (un metabolito de la testosterona) sobre los receptores prostáticos induce la proliferación masiva y el aumento de tamaño de las células epiteliales, las cuales sobreproducen la CPSE. A medida que la glándula se agranda y desarrolla HPB, la arquitectura celular y las uniones estrechas del epitelio se alteran, lo que, sumado a una intensa neovascularización, provoca que esta enzima —originalmente destinada al fluido seminal— se difunda masivamente a través de la barrera hemato-prostática hacia el torrente sanguíneo, incrementando sus niveles séricos de forma directamente proporcional al volumen del tejido prostático.*

La esterasa prostática específica canina (CPSE) es una serina-proteasa sintetizada casi exclusivamente por las células del epitelio glandular prostático, cuya expresión y secreción exocrina dependen estrechamente del estímulo de los andrógenos circulantes. Debido a que sus niveles en sangre reflejan directamente la masa celular activa del órgano, las concentraciones séricas de CPSE muestran una correlación proporcional con

el volumen glandular, consolidándose en los últimos años como una herramienta diagnóstica no invasiva de alta utilidad para el cribado, diagnóstico temprano y monitorización de diversas afecciones prostáticas en la especie canina [6–9,13,14]. En este contexto, Murillo & Martino (2026) demostraron recientemente una asociación positiva moderada entre la CPSE y el VP al evaluar una cohorte transversal de 16 perros enteros clínicamente asintomáticos. Sin embargo, las evaluaciones de corte transversal presentan una limitación intrínseca: ofrecen una captura estática en el tiempo que resulta insuficiente para describir la cinética, la velocidad de reducción sérica o la uniformidad con la que la actividad secretora epitelial y la estructura anatómica involucionan tras la supresión hormonal drástica inducida por la deprivación androgénica.

La orquiectomía bilateral elimina de forma permanente la principal fuente testicular de andrógenos, induciendo una cascada de apoptosis en el epitelio glandular junto con una reducción progresiva del estroma y del volumen de la próstata [10,12,15-17]. Aunque un estudio reciente realizado en una cohorte limitada de seis perros documentó que la reducción más acelerada tanto de la CPSE como del VP ocurre durante la primera semana postoperatoria, dicho trabajo limitó su período de observación a solo cuatro semanas. En consecuencia, la caracterización longitudinal extendida hasta los 90 días propuesta en esta investigación resulta importante para discernir con mayor precisión la respuesta bioquímica celular temprana de los procesos de remodelación anatómica y regresión estructural a largo plazo. Asimismo, un estudio con seguimiento temporal más amplio permite aportar referencias cinéticas estandarizadas de alta utilidad para el seguimiento clínico y la monitorización evolutiva del paciente canino en el periodo postquirúrgico.

El objetivo principal de la presente investigación fue cuantificar los cambios intraindividuales y secuenciales de la concentración sérica de la esterasa prostática específica canina (CPSE) y del volumen prostático (VP) a los 10 (D10), 30 (D30) y 90 (D90) días posteriores a la realización de una orquiectomía bilateral terapéutica, tomando como referencia sus respectivos valores basales (T0). De manera secundaria, el estudio se propuso caracterizar la dinámica de covariación temporal y la concordancia cinética a largo plazo entre ambos biomarcadores durante el proceso de involución y regresión tisular prostática, con el fin de determinar su complementariedad y utilidad potencial en la monitorización y seguimiento clínico del paciente con hiperplasia prostática benigna subclínica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio y selección de la muestra

Se diseñó un estudio observacional, longitudinal y retrospectivo basado en los registros clínicos de pacientes caninos que asistieron a consulta externa entre febrero de 2025 y agosto de 2026. Los datos correspondientes al valor basal (T0) proceden de una cohorte de 16 perros machos enteros y clínicamente asintomáticos, cuya caracterización inicial fue publicada previamente [1]. El presente trabajo constituye un análisis secundario y una extensión longitudinal de dicha investigación; para ello, se seleccionó una subcohorte de 14 individuos que cumplieron con el criterio de haber sido sometidos a una orquiectomía bilateral terapéutica. A partir de sus valores basales de CPSE y VP, el protocolo del estudio incorporó la recopilación y el análisis secuencial de los datos procedentes de las evaluaciones clínicas y ecográficas de control programadas a D10, D30 y D90 posteriores al procedimiento quirúrgico.

Población y criterios

Se incluyeron 14 perros machos enteros de 6–12 años, pertenecientes a distintas razas, con valores de CPSE T0 ≥70 ng/mL y hallazgos clínicos y/o ultrasonográficos registrados como compatibles con HPB, cuyos propietarios aceptaron el procedimiento de orquiectomía y para los que existían mediciones completas en los cuatro tiempos de control. Los animales estaban clínicamente sanos, con vacunación y desparasitación habituales sin ninguna terapia medica en curso [1]. Se excluyeron pacientes con valores de CPSE <70 ng/mL, con diagnósticos de prostatitis o neoplasias, tratamientos concomitantes o reposo sexual. Los 14 perros seleccionados fueron sometidos a orquiectomía bilateral bajo protocolos de sedación, inducción y anestesia general gaseosa. Los controles postquirúrgicos se efectuaron a los 10, 30 y 90 días, incluyendo consulta clínica, ecografía abdominal y análisis completos de emocromocitometría, bioquímica, y electroforesis sérica.

Examen ecográfico abdominal y análisis CPSE

Para las evaluaciones ecográficas abdominales en T0, D10, D30 e D90 se utilizó un equipo Samsung V6 (2023) con transductores microconvexo CA4-10M (4–10 MHz) y lineal LA3-14AD (3–14 MHz). El procedimiento fue realizado por un único veterinario especialista y las variables prostáticas se obtuvieron como se describe en el estudio precedente [1]. Los valores de

CPSE fueron determinados mediante inmunoensayo cuantitativo en el mismo laboratorio externo para los cuatro tiempos de análisis del estudio [1].

Análisis estadístico

Las variables de estudio fueron CPSE (ng/mL) y VP (cm^3) en D10, D30 y D90 comparados con T0 (los valores basales fueron publicados previamente por los autores [1]). Se calcularon valores residuales como 100 × valor poscastración/T0. Se estudio además la asociación intraindividual entre CPSE y VP durante el seguimiento clínico de los pacientes.

La unidad de análisis fueron los 14 perros incluidos en el estudio. Se verificaron integridad, rangos y coherencia de identificadores; no hubo datos ausentes en las ocho mediciones longitudinales. Dado el tamaño muestral, la asimetría de CPSE y el carácter pareado, los resultados se resumieron mediante media±DE y mediana (RIC), pero la inferencia principal fue no paramétrica. El efecto global del tiempo se evaluó mediante Friedman y se expresó como W de Kendall ($\chi^2/[n\times(k-1)]$). Las seis comparaciones confirmatorias T0–D10, T0–D30 y T0–D90 para las variables CPSE y VP se realizaron con la prueba de Wilcoxon pareado exacto bilateral y corrección secuencial de Holm. La asociación longitudinal entre log (CPSE) y log (VP) se estimó mediante correlación de medidas repetidas, eliminando las medias específicas de cada perro. Se emplearon pruebas bilaterales y α=0,05. No se realizó cálculo muestral a priori por tratarse de una extensión retrospectiva y se priorizaron los tamaños de efecto e IC.

3. RESULTADOS

Población analizada

Se analizaron 14 (87,5%) de los 16 perros descritos en el estudio precedente [1]. La edad media fue 9,36±2,02 años y el peso 27,47±18,13 kg. Todas las observaciones longitudinales fueron completas (56 visitas; 112 determinaciones primarias). En la tabla 1 se detallan los valores de media, mediana y rango para las variables CPSE y VP según los cuatro tiempos de análisis. T0, todos los perros presentaban CPSE ≥70 ng/mL; en D10, D30 y D90 todos mostraron valores <50 ng/mL.

Tabla 1. *Distribución longitudinal de CPSE y volumen prostático.*

Variable	Tiempo	Media ± DE	Mediana (RIC)	Rango
CPSE	T0	245,50 ± 131,26	225,00 (141,25–340,00)	72,0–480,0
	D10	20,76 ± 12,38	18,80 (9,32–31,90)	4,6–40,0
	D30	15,46 ± 9,09	16,15 (6,88–22,02)	4,1–34,5
	D90	12,84 ± 8,00	10,40 (8,03–18,18)	2,5–25,6
VP	T0	25,69 ± 11,22	26,20 (17,95–32,53)	8,9–45,8
	D10	14,37 ± 6,67	14,40 (10,12–17,70)	4,7–26,0
	D30	10,04 ± 4,70	10,10 (7,08–13,00)	3,5–18,6
	D90	7,69 ± 3,78	7,20 (5,53–9,90)	2,5–14,4

Los datos fueron asimétricos y no siguen una distribución normal. Se proporcionan valores de la media y desviación estándar (DE), mediana con rango intercuartílico (RIC) y rango para las variables CPSE y VP en los cuatro tiempos longitudinales analizados.

Evaluación de los cambios temporales respecto a los valores basales (T0)

Al evaluar la cinética postoperatoria de ambos parámetros respecto a los valores basales (T0), se identificó un patrón de reducción bimodal. En D10 postquirúrgico, la concentración sérica de la CPSE experimentó una reducción drástica del 92,0%, mientras que el volumen prostático (VP) disminuyó un 44,8%. Posteriormente, la CPSE continuó mostrando reducciones relativas marginales hasta D90; no obstante, el descenso neto entre D30 y D90 no fue estadísticamente significativo en los análisis de contraste post-hoc (p = 0,104). Por el contrario, el VP exhibió una disminución sostenida y estadísticamente significativa en todos los intervalos de tiempo consecutivos evaluados, consolidando una reducción acumulada del 70,7% en D90 (Tabla 2). La marcada atrofia tisular y la consecuente regresión morfológica del órgano tras la orquiectomía quedan ilustradas en la Fig. 2, donde las imágenes ultrasonográficas en modo bidimensional evidencian de forma representativa la reducción simétrica del parénquima prostático a lo largo del periodo de estudio.

Tabla 2. *Comparaciones de los valores de CPSE y VP previos (T0) y posteriores a la orquiectomía (D10, D30 y D90).*

Variable	Comparación	Razón geométrica (IC95%)	Cambio porcentual	r biserial	p-valor
CPSE	T0 vs D10	0,080 (0,071–0,090)	-92,0%	−1,00	<0,001*
CPSE	T0 vs D30	0,061 (0,052–0,071)	-93,9%	−1,00	<0,001*
CPSE	T0 vs D90	0,049 (0,042–0,057)	-95,1%	−1,00	<0,001*
Volumen prostático	T0 vs D10	0,552 (0,532–0,574)	-44,8%	−1,00	<0,001*
Volumen prostático	T0 vs D30	0,386 (0,367–0,406)	-61,4%	−1,00	<0,001*
Volumen prostático	T0 vs D90	0,293 (0,279–0,307)	-70,7%	−1,00	<0,001*

** Wilcoxon exacto bilateral; ajuste de Holm aplicado conjuntamente a las seis comparaciones T0–seguimiento.*

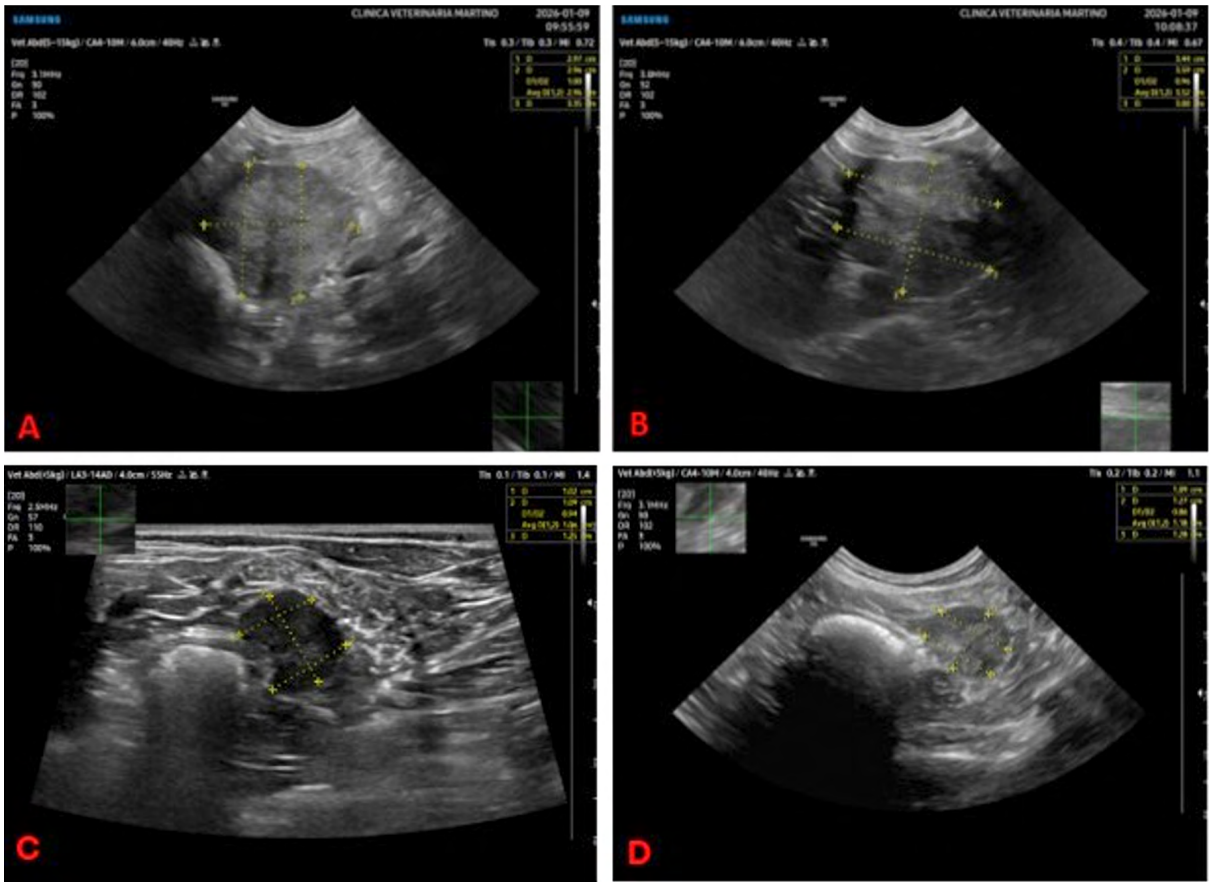


Figura 2. *Ultrasonografía modo B de las medidas de la próstata hiperplásica en un perro macho entero. (A, C): Plano transversal de la próstata; la altura y el ancho están delimitados por líneas amarillas. (B, D): Plano longitudinal con líneas amarillas que indican las medidas de la longitud prostática. Las imágenes ecográficas A-B se corresponden con un ejemplo de HPB en un perro en T0 (valores basales prequirúrgicos) mientras que C-D se corresponden con una evaluación ecográfica del mismo paciente en D90 postquirúrgico.*

Asociación longitudinal entre CPSE y volumen prostático

Tras controlar la variabilidad interindividual estable entre los sujetos y analizar ambas variables en escala logarítmica, la correlación para medidas repetidas reveló una asociación estrecha y estadísticamente significativa (r = 0,921; IC 95%: 0,858–0,957; gl = 41; p < 0,001). Este resultado demuestra de forma robusta que, de manera intraindividual, las disminuciones en el volumen prostático coexisten estrechamente con la reducción de la CPSE sérica. No obstante, esta fuerte asociación longitudinal refleja una sincronía biológica, no debe interpretarse como capacidad predictiva individual directa ni como una validación diagnóstica de umbrales clínicos absolutos, sobre todo durante el período postquirúrgico temprano (Fig. 3-4).

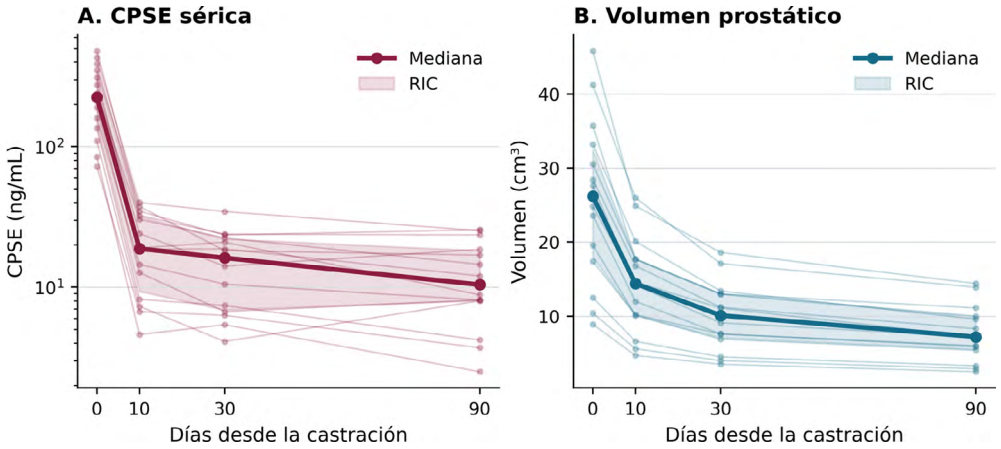


Figura 3. *Trayectorias individuales (líneas finas) y mediana con rango intercuartílico (línea gruesa y banda) de CPSE sérica y volumen prostático. El eje de CPSE se representa en escala logarítmica.*

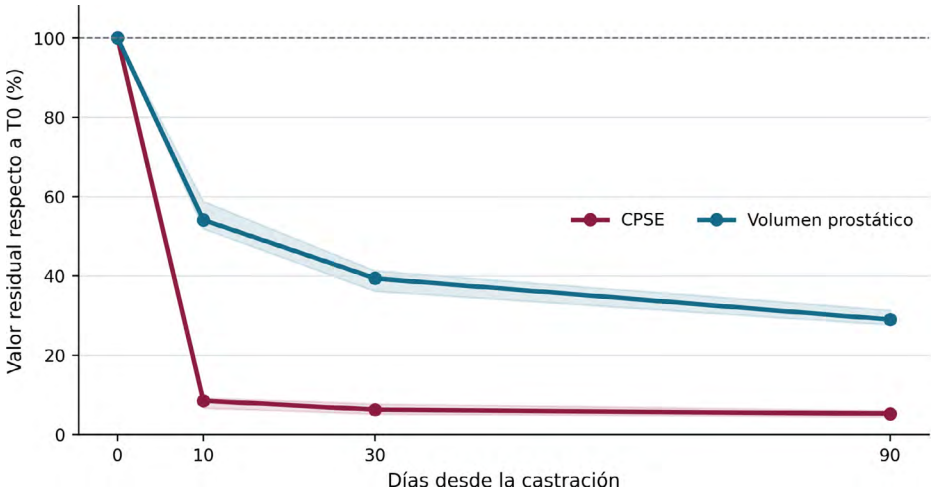


Figura 4. *Mediana y rango intercuartílico del valor residual respecto de T0. La caída bioquímica de CPSE fue más rápida que la involución anatómica del volumen prostático.*

Los resultados de este estudio longitudinal demuestran la existencia de dos dinámicas cinéticas diferenciadas en la respuesta prostática tras la deprivación androgénica por orquiectomía. Por un lado, se identificó una supresión funcional extremadamente rápida de la CPSE sérica, la cual experimentó una disminución sérica cercana al 92% apenas al décimo día postoperatorio. Por otro lado, la involución anatómica del parénquima prostático exhibió una cronología significativamente más gradual, alcanzando una reducción volumétrica aproximada del 45% en D10 y consolidando una regresión estructural del 71% hacia el día 90. La concordancia direccional entre los individuos y la magnitud de los tamaños de efecto demuestran que el patrón observado es biológicamente consistente; esto sugiere que, a pesar de las restricciones de un tamaño muestral reducido, la robustez de la respuesta bioquímica y tisular confiere una alta validez interna a la cohorte de datos presentados.

La caída temprana de CPSE se explica dado su origen epitelial y dependencia androgénica [5, 10,11,16-18]. La reducción de testosterona induce pérdida de actividad secretora y atrofia del epitelio acinar antes de que finalice la remodelación de todos los componentes glandulares [10–14]. Esto explica que CPSE alcanzara valores bajos en D10, mientras que el VP siguiera descendiendo hasta D90. Cazzuli et al. describieron cambios morfométricos y endocrinos posteriores a la castración [15], y Borikappakul et al. observaron, en seis perros con HPB subclínica, una reducción aproximada de CPSE del 90% y de VP del 44% durante la primera semana [2]. La magnitud en D10 de nuestra cohorte es notablemente concordante, pero el seguimiento a 90 días añade evidencia de que la regresión anatómica continúa después de la estabilización bioquímica inicial.

Todos los perros presentaron CPSE <50 ng/mL en D10. Este hallazgo puede ser clínicamente útil como referencia descriptiva, sin embargo, la cohorte fue seleccionada por CPSE basal elevada, carece de grupo control y no incluyó un estándar de referencia histológico. Los valores limite publicados se diseñaron principalmente para cribado de perros enteros y no deben trasladarse automáticamente al seguimiento posoperatorio [6–9,18-20]. Una CPSE persistentemente elevada podría justificar una investigación adicional, pero su sensibilidad y especificidad para prostatitis, tejido residual o neoplasia no pueden estimarse en el presente estudio.

La fuerte correlación intraindividual observada entre la CPSE y el volumen prostático (VP) refuerza el carácter complementario de ambos biomarcadores en el seguimiento postquirúrgico. Desde una perspectiva metodológica, es crucial destacar que esta asociación se estimó mediante modelos de correlación para medidas repetidas, evitando el sesgo estadístico común de agrupar las 56 evaluaciones temporales como si se tratara de observaciones independientes de corte transversal. Este enfoque metodológico preserva la estructura longitudinal de los datos y permite aislar la verdadera varianza biológica que ocurre de forma simultánea dentro de cada individuo a lo largo del tiempo.

Al analizar la cinética de ambos parámetros, los resultados sugieren una asincronía fisiológica tras la orquiectomía: la CPSE sérica capta con mayor sensibilidad y rapidez la supresión funcional de las células epiteliales prostáticas derivada de la deprivación androgénica, mientras que la ultrasonografía refleja la respuesta morfológica y la apoptosis tisular gradual, un proceso macroscópico que requiere más tiempo para consolidarse [7,11]. Desde un punto de vista traslacional, estos hallazgos sugieren que el D10 constituye un punto temporal idóneo para confirmar la respuesta bioquímica temprana y el éxito de la orquiectomía. Por el contrario, el tiempo D30–D90 resulta óptimo para verificar la involución anatómica continuada y la resolución morfológica de la hiperplasia [7,10,11,20].

Las principales limitaciones de este estudio incluyen el tamaño muestral reducido, su diseño retrospectivo y la ausencia de un grupo control compuesto por animales intactos. Asimismo, se debe considerar la variabilidad racial y de peso corporal entre los individuos, junto con la falta de confirmación histopatológica de la hiperplasia prostática benigna (HPB). No obstante, la relevancia clínica de estos hallazgos radica en que proporcionan datos evolutivos sobre la CPSE sérica y el volumen prostático postorquiectomía, un área con escasa literatura disponible. En consecuencia, este trabajo aporta información valiosa que contribuye directamente a la toma de decisiones en la práctica clínica diaria para el manejo de pacientes con hiperplasia prostática subclínica.

4. CONCLUSIONES

La orquiectomía bilateral se asoció con una reducción rápida, marcada y uniforme de la CPSE sérica, precediendo a una involución anatómica progresiva del volumen prostático que se extendió hasta los 90 días. Estos hallazgos respaldan la integración de ambos biomarcadores en la práctica clínica, posicionando a la CPSE como un indicador temprano de supresión funcional y a la ecografía como la herramienta de elección para el seguimiento morfológico continuo. No obstante, se requieren estudios prospectivos en cohortes más amplias que evalúen la repetibilidad de estas mediciones para definir con precisión los intervalos esperados y establecer umbrales de alerta postquirúrgicos.

5. CONFLICTO DE INTERESES

El presente trabajo no presenta ningún conflicto de interés para los autores y sus respectivas instituciones.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Murillo A, Martino M. Asociación entre la concentración sérica de esterasa prostática específica canina (CPSE) y el volumen prostático evaluado mediante ultrasonografía en perros enteros asintomáticos. Reciena. 2026;6(1):49–55. https://doi.org/10.47187/ad3pje87

2. Borikappakul P, Suwimonteerabutr J, Ponglowhapan S. Rapid post-castration decline in serum canine prostatic specific esterase (CPSE) and prostatic volume in dogs with benign prostatic hyperplasia. Thai J Vet Med. 2026;56(1):1–8. https://doi.org/10.56808/2985-1130.3965.

3. Derakhshandeh N, et al. Diagnosis and treatment of benign prostatic hyperplasia in dogs: new approaches. Vet Med Int. 2025; 2025:4153172. https://doi.org/10.1155/vmi/4153172

4. Cunto M, Ballotta G, Zambelli D. Benign prostatic hyperplasia in the dog. Anim Reprod Sci.

2022;247:107096. http://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2022.107096

5. Holst, B.S., Carlin, S., Fouriez-Lablée, V. et al. Concentrations of canine prostate specific esterase at baseline are associated with the relative size of the prostate at three-year follow-up. BMC Vet Res 17, 173 (2021). https://doi.org/10.1186/s12917-021-02874-1

6. Alonge S, Melandri M, Leoci R, Lacalandra GM, Aiudi G. Canine prostate specific esterase as a useful biomarker in a preventive screening programme: threshold value assessment and correlation with ultrasonographic abnormalities. Reprod Domest Anim. 2018;53(2):359–364. http://doi.org/10.1111/rda.13113

7. Holst BS, Carlin S, Fouriez-Lablée V, et al. Concentrations of canine prostate specific esterase at baseline are associated with the relative size of the prostate at three-year follow-up. BMC Vet Res. 2021;17:173. https://doi.org/10.1186/s12917-021-02874-1.

8. Holst BS, Holmroos E, Friling L, et al. The association between serum concentration of canine prostate specific esterase and size of the canine prostate. Theriogenology. 2017;93:33–39. https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.01.032.

9. Pinheiro D, Machado J, Viegas C, et al. Evaluation of canine-prostate specific arginine esterase for diagnosis of benign prostatic hyperplasia. BMC Vet Res. 2017;13:76. https://doi.org/10.1186/s12917-017-0996-5.

10. Rodríguez-Trujillo, R., Batista-Arteaga, M. and Iusupova, K. (2026), Canine prostatic-specific esterase and prostatic ultrasound correlation in dogs: diagnostic value, influence of castration and clinical cut-off proposal. J Small Anim Pract, 67: 413-421. https://doi.org/10.1111/jsap.70066

11. Spada S, De Felice D, Arlt S, Aires LPN, England GCW and Russo M (2025). Long-term ultrasonographic changes of the canine prostate gland after castration. Front. Vet. Sci. 11:1524896. http://doi.org/10.3389/fvets.2024.1524896

12. Posastiuc, F.-P., Constantin, N.-T., Domain, G., Spanoghe, L., Van Soom, A., Diaconescu, A. I., & Codreanu, M.-D. (2025). Is Canine Prostate-Specific Esterase a Reliable Marker for Benign Prostatic Hyperplasia Progression in Dogs? Animals, 15(11), 1614. https://doi.org/10.3390/ani15111614

13. Polisca, A., Troisi, A., Zelli, R., Menchetti, L., & Fontbonne, A. (2022). Canine prostatic specific esterase (CPSE) as a biomarker for the diagnosis and monitoring of prostatic diseases in dogs. Animals, 12(7), 846. https://doi.org/10.3390/ani12070846

14. Polisca, A., Troisi, A., Fontaine, E., Menchetti, L., Fontbonne, A., & Zelli, R. (2016). A new diagnostic tool for canine prostatic disorders: Serum canine prostate-specific esterase (CPSE). Reproduction in Domestic Animals, 51(2), 193–197. http://doi.org/10.1111/rda.12664

15. Cazzuli G, Damián JP, Molina E, Pessina P. Post-castration prostatic involution: a morphometric and endocrine study of healthy canines and those with benign prostatic hyperplasia. Reprod Domest Anim. 2022;57(2):157–164. https://doi.org/10.1111/rda.14036.

16. Seiler, G. S., Cohen, E. B., d'Anjou, M. A., French, J., Gaschen, L., Knapp, S., ... & Saunders, H. M. (2022). ACVR and ECVDI consensus statement for the standardization of the abdominal ultrasound examination. Veterinary Radiology & Ultrasound, 63(6), 661-674. http://doi.org/10.1111/vru.13151

17. Palmieri, C., & Lean, F. Z. (2020). Pathology of canine prostatic diseases: An update. Veterinary Pathology, 57(6), 775–791. http://doi.org/10.1177/0300985820941456

18. Melandri M, Alonge S. Highlights on canine prostatic specific esterase: a diagnostic and screening tool in veterinary andrology. Vet Med Sci. 2021;7(1):35–40. http://doi.org/10.1002/vms3.349

19. Laurusevičius T, Šiugždaitė J, Juodžiukynienė N, et al. Comparative evaluation of diagnostic methods for subclinical benign prostatic hyperplasia in intact breeding male dogs. Animals. 2024;14(8):1204. http://doi.org/010.3390/ani14081204.

20. O'Connor AM, Sargeant JM, Dohoo IR, et al. Explanation and elaboration document for the STROBE-Vet statement. J Vet Intern Med. 2016;30(6):1896–1928. http://doi.org/10.1111/jvim.14592

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 06/08/2026 · *Aceptado:* 25/08/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/1fw1py49

BIOADSORBENTE DE MUSA PARADISIACA COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE AL CARBÓN ACTIVADO PARA LA REMOCIÓN DE CIANOBACTERIAS Y CIANOTOXINAS EN AGUA DEL RÍO DAULE, ECUADOR

MUSA PARADISIACA BIOADSORBENT AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE TO ACTIVATED CARBON FOR THE REMOVAL OF CYANOBACTERIA AND CYANOTOXINS FROM DAULE RIVER WATER, ECUADOR

[1,] Villa Sanchéz Fabiola*	fabiola.villas@ug.edu.ec
[1] Coloma Coloma Tony	tony.colomac@ug.edu.ec
[1] Briones Rosado Aleska	aleska.brionesr@ug.edu.ec
[1] Caiza Alay Maria	maria.caizaa@ug.edu.ec

[1] Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, Guayas, Ecuador.

E-mail: fabiola.villas@ug.edu.ec *

RESUMEN

La eutrofización en ecosistemas de agua dulce tropicales ha intensificado la proliferación de cianobacterias, generando riesgos no solamente para la salud pública sino para el equilibrio ecológico, por ello, esta investigación tuvo como objetivo comparar el desempeño del carbón activado convencional frente a un bioadsorbente elaborado con cáscara de plátano (Musa paradisíaca) en agua del río Daule. Se empleó un diseño experimental cuantitativo, evaluando dosis de 0,5; 1 y 2 gramos por cada 100 ml de muestra. El bioadsorbente se sintetizó mediante activación con H3PO4 al 50% (relación 2:1), carbonización a 500 °C durante 1 hora y lavado hasta alcanzar un pH neutro. Las muestras se analizaron con siembra en BG 11 y fotómetro HACH DR 900; los resultados evidenciaron que el bioadsorbente removió el 97,45% de cianobacterias y 77,1% de nitratos, superando al carbón convencional con 96,30% y 35,40%, respectivamente (ANOVA F=1800,755; p < 0,001). Se concluye que se cumplió el objetivo planteado, demostrando la superioridad del bioadsorbente a partir de cáscara de plátano.

Palabras clave: *bioadsorbente, cáscara de plátano, carbón activado, cianobacterias, remoción, río Daule.*

ABSTRACT

Eutrophication in tropical freshwater ecosystems has intensified cyanobacterial blooms, generating risks not only for public health but also for ecological balance. Therefore, this research aimed to compare the performance of conventional activated carbon against a biosorbent made from banana peel (Musa paradisiaca) in water from the Daule River. A quantitative experimental design was employed, evaluating doses of 0.5, 1, and 2 grams per 100 ml of sample. The biosorbent was synthesized through activation with 50 % H_3PO_4 (2:1 ratio), carbonization at 500 °C for 1 hour, and washing until reaching neutral pH. Samples were analyzed using BG-11 plating and a HACH DR 900 photometer; results showed that the biosorbent removed 97.45 % of cyanobacteria and 77.1 % of nitrates, surpassing conventional carbon with 96.30 % and 35.40 %, respectively (ANOVA F=1800.755; $p < 0.001$). It is concluded that the proposed objective was achieved, demonstrating the superiority of the banana peel-derived biosorbent.

Keywords: *biosorbent, banana peel, activated carbon, cyanobacteria, removal, Daule River*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la eutrofización de cuerpos de agua dulce ha emergido como uno de los principales desafíos para la preservación de los cuerpos hídricos superficiales. Este proceso consiste en el enriquecimiento excesivo de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, provenientes de actividades agrícolas, descargas urbanas y efluentes industriales, lo que genera condiciones propicias para el crecimiento descontrolado de microorganismos fotosintéticos, entre los que destacan las cianobacterias [1].

Las cianobacterias son microorganismos procariotas fotosintéticos ampliamente distribuidos en ecosistemas acuáticos cuya relevancia radica en su capacidad para producir metabolitos secundarios conocidos como cianotoxinas [2], entre las cianotoxinas más estudiadas se encuentran las microcistinas, las cuales han sido detectadas en cuerpos de agua de diversas regiones del mundo, asociándolas con casos de intoxicación [3]. Estas sustancias representan un riesgo significativo para la salud humana y animal debido a su potencial hepatotóxico, neurotóxico y dermatotóxico [4].

La región costera de Ecuador particularmente la provincia de Guayas presenta condiciones climáticas favorables para el desarrollo de floraciones de cianobacterias, puesto que cuenta con un clima tropical caracterizado por temperaturas elevadas, radiación solar y periodos de sequía e inundaciones combinados con la descarga de nutrientes provenientes de la agricultura intensiva [5]. El río Daule constituye la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Guayaquil y su área metropolitana por lo que la presencia de cianobacterias en sus aguas representa un riesgo directo para la salud de todos los habitantes [6].

Las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas incluyen diversos procesos fiscoquímicos y biológicos entre estos el uso de carbón activado, ya que presenta una elevada capacidad de retención de compuestos orgánicos y su versatilidad operativa, sin embargo el elevado costo de este material y su dependencia de recursos no renovables han motivado la búsqueda de alternativas más sostenibles [7]. En este contexto los residuos agroindustriales han despertado un creciente interés como precursores para la obtención de materiales adsorbentes de bajo costo y menor impacto ambiental entre estos residuos la cáscara de plátano representa una fuente abundante de biomasa lignocelulósica en Ecuador debido a la alta producción y exportación de este fruto, además de la presencia de grupos funcionales como hidroxilos, carbóxidos y carbonilos en la superficie de la biomasa lo cual facilita la interacción con diversos contaminantes mediante mecanismos de adsorción física y química [8].

Investigaciones previas han demostrado la eficiencia de adsorción derivados de residuos vegetales en la remoción de metales pesados colorantes y compuestos orgánicos de soluciones acuosas [9], específicamente se ha reportado que el carbón activado obtenido a partir de cáscara de plátano presenta eficiencias de remoción superiores al 90% para diversos contaminantes bajo condiciones optimizadas.

Sin embargo existe una limitada evidencia científica respecto a la aplicación de estos materiales para la remoción de cianobacterias y sus toxinas en cuerpos de agua superficiales la presente investigación se fundamenta en la hipótesis de que el adsorbente elaborado a partir de cáscara de plátano (Musa paradisiaca) presenta una capacidad de remoción de cianobacterias superior o comparable a la del carbón activado convencional, esta hipótesis se sustenta en las propiedades fisico químicas de la biomasa lignocelulósica y en los antecedentes reportados en la literatura científica, planteando de esta forma como objetivo general de este estudio comparar el comportamiento del carbón activado convencional y del bioadsorbente de cáscara de plátano frente a la presencia de cianobacterias en muestras de agua del río Daule.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño Experimental

La presente investigación se enmarcó en un diseño experimental de tipo cuasiexperimental con enfoque cuantitativo, donde la variable independiente correspondió al tipo de adsorbente aplicado (carbón activado convencional y bioadsorbente de cáscara de plátano), mientras que la variable dependiente fue la presencia de cianobacterias viables, determinada mediante conteo de unidades formadoras de colonias por mililitro. Para ello, se evaluaron tres niveles de dosis (0,5; 1,0 y 2,0 gramos por cada 100 mililitros de agua) y cada tratamiento se realizó por triplicado con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados. El estudio se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil durante el período comprendido entre abril y julio de 2026.

Obtención y preparación de la materia prima

La materia prima para la obtención del bioadsorbente consistió en cáscaras de plátano de la variedad dominico Musa paradisiaca en estado verde, las cuales fueron recolectadas en un establecimiento de venta de alimentos ubicado al suroeste de la ciudad de Guayaquil. En total se recolectaron 14,235 kilogramos de cáscaras, que fueron sometidas a una inspección visual para descartar aquellas que presentaban signos de deterioro, maduración excesiva o daños mecánicos, obteniendo finalmente 12,350 kilogramos de materia prima en condiciones óptimas.

Las cáscaras seleccionadas fueron lavadas con agua destilada para eliminar residuos de tierra e impurezas superficiales, y posteriormente se cortaron en trozos de aproximadamente 2 a 3 centímetros para facilitar las etapas posteriores del proceso. El material cortado fue sometido a un pre-secado natural mediante exposición directa a la luz solar durante cuatro días, lo que permitió reducir el contenido de humedad inicial y alcanzar un peso de 3,485 kilogramos con una humedad del 23 por ciento. Luego, se realizó un secado en estufa de laboratorio MEMMERT modelo UM 500 a 105 grados Celsius durante 10 horas para reducir la humedad al 8 por ciento, obteniendo así 1,364 kilogramos de material seco.

El material deshidratado fue sometido a molienda en un molino automático y posteriormente tamizado utilizando un juego de tamices acoplados a una máquina vibradora; de este proceso se recuperaron 0,706 kilogramos de material con un tamaño de partícula de 0,300 milímetros, correspondiente a la malla número 50. Esta fracción fue seleccionada para el proceso de activación química, ya que los estudios previos indican que tamaños de partícula en este rango favorecen la eficiencia de adsorción al proporcionar una mayor superficie de contacto.

Activación Química y carbonización

El proceso de activación química se realizó utilizando ácido fosfórico al 50 por ciento como agente activador, en una relación de 2 mililitros de ácido por cada gramo de biomasa, relación que fue seleccionada después de evaluar las proporciones 1:1 y 2:1, y al observar que esta última producía un material con mejor coloración y textura. Una vez preparada la mezcla, esta fue agitada durante 30 minutos y posteriormente se dejó en reposo durante 24 horas para asegurar una impregnación adecuada del ácido en la estructura de la biomasa.

El material impregnado fue sometido a deshidratación en estufa a 110 grados Celsius durante 24 horas, para luego proceder con la carbonización, la cual se llevó a cabo en una mufla THERMOLYNE modelo FBI 400 a una temperatura de 500 grados Celsius durante una hora; cabe señalar que esta temperatura fue seleccionada después de descartar los 550 grados Celsius, ya que esta última producía un material de consistencia asfáltica con propiedades adsorbentes deficientes. Finalmente, el material carbonizado fue lavado con agua destilada a 80 grados Celsius en repetidas ocasiones hasta alcanzar un pH neutro, y una vez logrado esto, el producto fue filtrado y deshidratado en estufa a 105 grados Celsius durante una hora, para después ser almacenado en recipientes herméticos con el fin de garantizar su conservación.

Caracterización del bioadsorbente

El bioadsorbente obtenido fue caracterizado en el Laboratorio de Análisis Químico Instrumental LAQUINS de la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, donde se determinó el contenido de humedad siguiendo el método ASTM D 3173, el contenido de cenizas según ASTM D 1762 y la densidad aparente mediante un método interno del laboratorio; estos parámetros permiten evaluar la calidad del material y su potencial como adsorbente en aplicaciones de tratamiento de agua.

Recolección y caracterización de muestras de agua

Las muestras de agua fueron recolectadas en el río Daule específicamente en el sector El Señor de los Milagros cercano a la parroquia Ximena en el cantón Daule en las coordenadas geográficas 1.867178 grados de longitud sur y 79.987566 grados de longitud oeste. Esta zona fue seleccionada por ser representativa de las condiciones hidrológicas del río y por presentar actividades agrícolas intensivas que contribuyen al aporte de nutrientes, el muestreo se realizó siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar la conservación de las muestras.

Antes y después de los tratamientos se hizo la caracterización de parámetros fisicoquímicos como nitratos, nitritos, fosfatos y pH con un fotómetro portátil (HACH DR 900), siguiendo los métodos estandarizados del fabricante, cada análisis se realizó por triplicado para asegurar la precisión de los resultados.

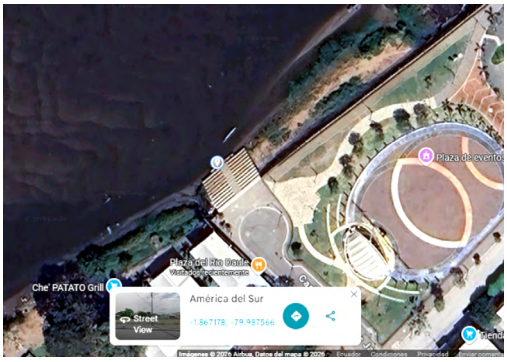


Figura 1. *Ubicación geográfica de toma de muestras de agua en el río Daule (Parroquia Ximena).*

Ensayos de adsorción

Los ensayos de adsorción se llevaron a cabo mediante un proceso por lotes a escala de laboratorio, se utilizaron vasos de precipitación de 250 ml, en los cuales se colocaron 100 ml de agua del río Daule sin tratar. Se ensayaron con tres dosis diferentes 0,5; 1,0 y 2,0 gramos, la agitación se mantuvo durante un tiempo de contacto de una hora para asegurar la homogeneización de la mezcla y el contacto adecuado entre el adsorbente y el agua. El tiempo fue seleccionado basándose en estudios previos que indican que la adsorción alcanza el equilibrio en periodos de 30 a 60 minutos.

Transcurrido el período de contacto cada muestra fue filtrada y almacenada para su posterior análisis fisicoquímico y microbiológico, rotuladas y en condiciones ambientales controladas a una temperatura ambiente de 25 °C.

Análisis microbiológico

Para la cuantificación de cianobacterias se preparó el medio de cultivo BG-11 con la adición de agar al 1.7% siguiendo las especificaciones del fabricante, ampliamente utilizado, ya que proporciona los nutrientes necesarios para su crecimiento, las muestras fueron sometidas a diluciones seriadas en medio BG-11 líquido, la siembra se realizó por diseminación en superficie en placas Petri, con el medio sólido inoculando 100 microlitros de cada dilución.

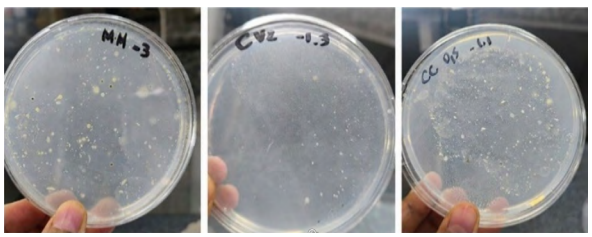


Figura 2. *Unidades formadoras de colonias visibles despues de cada tratamiento(MM: muestra sin tratar; CV: bioadsorbente de cáscara de platano; CC: carbón convencional)*

La incubación se llevó a cabo a temperatura ambiente bajo un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad durante 7 días, tiempo suficiente para que las cianobacterias formen colonias visibles que puedan ser contadas.

Cada conteo se realizó por triplicado, seleccionando aquellas placas que presentaran entre 25 y 250 colonias siguiendo las recomendaciones de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos para el conteo microbiológico.

3. RESULTADOS

Caracterización del bioadsorbente

La **Tabla 1** presenta los resultados de la caracterización del bioadsorbente como el contenido de humedad, cenizas, densidad aparente y número de yodo, resultados que demuestran que el bioadsorbente se encuentra dentro de las normas estipuladas.

Tabla 1. *Caracterización del bioadsorbente de Musa paradisiaca.*

Parámetro	Unidad	Resultado	Método
Humedad	%	1.98	ASTM D 3173
Cenizas	%	4.01	ASTM D 1762
Densidad aparente	g/mL	0.2462	Método interno
Número de yodo	-	600.52	ASTM D4607

Nota: *Los análisis fueron realizados por el Laboratorio de Análisis Químico Instrumental LAQUINS de la ESPOL.*

Eficiencia de remoción de nutrientes

La Tabla 2 presenta los resultados de remoción de nutrientes asociados a la eutrofización de estos microorganismos, nutrientes que fueron medidos antes y después de los tratamientos, mostrando una remoción de 77,1% de nitratos con el bioadsorbente elaborado (CV2) a la dos de 2 gramos superior a los obtenidos con el carbón convencional, mismos que se compararos con los obtenidos de la muestra sin tratar (MM).

Tabla 2. *Comparación de la eficiencia de remoción entre carbón convencional (CC) y bioadsorbente de cáscara de plátano (CV).*

		Parámetro (mg/L)				
		Nitratos	**Remoción NO_3 (%)**	**Nitritos**	**Remoción NO_2 (%)**	**Fosfatos**
MM		9.6	-	0.025	-	2
CC	0.5	3.9	59.4%	0.012	52%	5.2
	1	5.6	41.7%	0.012	52%	6.4
	2	6.2	35.4%	0.012	52%	7

	0.5	3	68.8%	0.012	52%	5
CV	1	2.5	74.0%	0.008	68%	5.4
	2	2.2	77.1%	0.008	68%	5.8

Remoción de cianobacterias

Para esta sección se realizó el conteo de UFC/ml por triplicado, el conteo reflejo los siguientes resultados **Tabla 3**, dando un porcentaje de remoción de 97,75% de cianobacterias con el bioadsorbente elaborado ligeramente superior a 96.30% obtenido con el carbón convencional.

Para este conteo se implementó la siguiente ecuación

$$\frac{\text{numero de colonias}}{\text{(Volumen sembrado en ml * factor de disolucion)}}$$

Tabla 3. *Recuento de cianobacterias (UFC/ml) en los diferentes tratamientos..*

	Control	CC 0.5	CC 1	CC 2	CV 0.5	CV 1	CV 2
R1(UFC/mL)	23600	1500	1200	950	1120	950	650
R2 (UFC/mL)	24800	1440	1220	900	1100	840	640
R3 (UFC/mL)	24900	1450	1180	860	990	960	580
Promedio (UFC/mL)	24433.33	1463.33	1200	903.33	1070	916.67	623.33
Remoción (%)	-	94,01	95,09	96,30	95,62	96,25	97,45

En la Tabla 4 se presentan los valores de UFC/mL transformados a Log10 (UFC); con ello se buscó cumplir los supuestos del análisis de varianza (ANOVA), estabilizando la varianza y normalizando la distribución.

Tabla 4. *Valores transformados a Log10 (UFC) de cada tratamiento, respectivamente*

	Control	CC 0.5	CC 1	CC 2	CV 0.5	CV 1	CV 2
R1	4.373	3.176	3.079	2.978	3.049	2.978	2.813
R2	4.394	3.158	3.086	2.954	3.041	2.924	2.806
R3	4.396	3.161	3.072	2.934	2.996	2.982	2.763

Análisis de varianza (ANOVA)

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor a los datos transformados, para así determinar si existían diferencias significativas entre los grupos evaluados (Control, CC y CV)

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) demuestran que, al ser el valor de F significativamente mayor que el valor crítico, existe una diferencia estadística significativa entre los tratamientos evaluados.

El p-valor (2.18292E-19) obtenido es un valor mucho menor que el nivel de significancia establecido confirmando que al menos uno de los tratamientos presenta una reducción significativa de cianobacterias en comparación con los demás, valores reflejados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. *Valores transformados a Log10 (UFC) de cada tratamiento, respectivamente*

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Entre las muestras	5.2122772	6	0.8687129	1800.755
Dentro de las muestras	0.0067538	14	0.0004824	
Total	5.2190310	20	0.2609515	

Valor critico	2.847725996
p-valor	2.18292E-19

Para identificar qué tratamientos presentan diferencias significativas entre sí, se realizó la prueba múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$), mediante esta prueba, se determinó la diferencia significativa entre cada grupo.

La prueba de Tukey (Tabla 6) mostró que CV 2 (letra E) fue significativamente diferente a todos los demás tratamientos.

Tabla 6. *Agrupación de tratamientos según Tukey.*

Tratamiento	Dosis (g/100 m/L)	Log_{10} UFC	DE	Grupo Tukey
MM	-	4,388	0,013	**A**
CC	0.5	3,165	0,009	**B**
	1	3,079	0,007	**C**
	2	2,956	0,022	**D**
CV	0.5	3,029	0,028	**D**
	1	2,961	0,031	**D**
	2	2,795	0,027	**E**

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que el bioadsorbente de cáscara de plátano presenta una eficiencia de remoción de cianobacterias superior a la del carbón activado convencional, alcanzando un 97.45 % frente al 96.30% del carbón convencional a la misma dosis de 2.0 gramos por 100 mililitros. Esta diferencia, aunque parece modesta en términos porcentuales, es estadísticamente significativa, como lo confirma el análisis de varianza ($F = 1800.755$; $p < 0.001$) y la prueba de Tukey, que posicionó al CV 2 en un grupo estadísticamente diferente al de CC 2. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han reportado eficiencias superiores al 90 % en la remoción de diversos contaminantes utilizando bioadsorbentes derivados de cáscara de banana [10].

La mayor eficiencia observada con el bioadsorbente puede explicarse por sus características fisicoquímicas particulares que difieren de las del carbón activado convencional. La composición lignocelulósica de la cáscara de plátano, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, confiere al material una estructura porosa con una elevada superficie específica y una amplia distribución de grupos funcionales oxigenados [11]. Estos grupos funcionales, entre los que destacan los hidroxilos (-OH), carboxilos (-COOH) y carbonilos (C=O), favorecen la interacción electrostática y el intercambio iónico con las superficies celulares de las cianobacterias, lo que potencia el proceso de adsorción [12].

La remoción de nitratos alcanzada por el bioadsorbente (77.1 %) supera ampliamente a la del carbón activado convencional (35.4 %), lo que constituye un hallazgo de particular relevancia. Los nitratos, como nutrientes esenciales para el crecimiento de cianobacterias, son responsables directos de la eutrofización y la proliferación de floraciones algales. La capacidad del bioadsorbente para remover nitratos sugiere que su aplicación no solo elimina las cianobacterias existentes, sino que también reduce la disponibilidad de nutrientes necesarios para su crecimiento futuro, generando un efecto sinérgico en el control de la proliferación de estos microorganismos. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de sitios activos cargados positivamente en la superficie del bioadsorbente, que favorecen la retención de aniones nitrato a través de interacciones electrostáticas [13].

La diferencia en el comportamiento del pH entre ambos adsorbentes merece una atención especial. El carbón activado convencional generó un ambiente alcalino con valores superiores a 8, mientras que el bioadsorbente acidificó ligeramente el agua con valores entre 6.9 y 7.7. Este fenómeno puede atribuirse a la naturaleza química de la superficie de cada material. Durante el proceso de activación con ácido fosfórico, la superficie del bioadsorbente adquiere grupos fosfato y grupos ácidos carboxílicos que pueden liberar protones al medio acuoso, reduciendo el pH [14]. Por el contrario, el carbón activado convencional, especialmente aquel con alta temperatura de activación, puede presentar una superficie básica debido a la presencia de grupos pirónicos y crómenos que capturan protones del medio [15].

Es importante señalar que ambos adsorbentes mostraron un incremento en la concentración de fosfatos después del tratamiento. Este fenómeno, aunque indeseable, puede explicarse por la liberación de fósforo desde la superficie de los materiales durante el proceso de adsorción, posiblemente debido a la desorción de fosfatos que se encontraban retenidos en la estructura del material o a la liberación de compuestos fosforados residuales del proceso de activación [14].

La comparación de los resultados con estudios previos permite contextualizar los hallazgos de la presente investigación. Al-sareji et al. [16] reportaron una eficiencia de remoción de contaminantes farmacéuticos del 92 por ciento utilizando carbón activado de cáscara de plátano, mientras que Bakar et al. [11] alcanzaron eficiencias superiores al 95 % en la remoción de colorantes. Estos valores son comparables al 97.45 % obtenido en la presente investigación para la remoción de cianobacterias, lo que sugiere que el bioadsorbente de cáscara de plátano es un material versátil con aplicabilidad en la remoción de una amplia gama de contaminantes. Sin embargo, es importante reconocer que la mayoría de estos estudios se han realizado en condiciones de laboratorio con soluciones sintéticas, mientras que la presente investigación utilizó agua real del río Daule, lo que añade complejidad al sistema debido a la presencia de materia orgánica natural, sólidos suspendidos y otros contaminantes que pueden competir por los sitios de adsorción [17].

En términos de sostenibilidad, la valorización de este residuo para la producción de materiales adsorbentes no solo reduce el costo del tratamiento de agua, sino que también contribuye a la gestión sostenible de los residuos sólidos y a la economía circular. Además, el proceso de activación química con ácido fosfórico, aunque requiere un manejo cuidadoso, es menos energético que la activación física con vapor o CO_2, lo que reduce la huella de carbono del proceso [18].

5. CONCLUSIONES

El estudio comparativo permitió demostrar que el bioadsorbente de cáscara de plátano (Musa paradisiaca) presenta un comportamiento superior al del carbón activado convencional en la remoción de cianobacterias presentes en el agua del río Daule.

El bioadsorbente alcanzó una eficiencia de remoción de cianobacterias del 97,45% a la dosis de 2,0 g/100 ml, superando al carbón activado convencional que registró 96,30% en las mismas condiciones. Adicionalmente, demostró una capacidad superior para la remoción de nitratos (77,1% frente al 35,4% del carbón convencional), lo que evidencia su potencial para mitigar los procesos de eutrofización asociados a la proliferación de estos microorganismos.

La caracterización de síntesis implementada, que incluyó activación química con ácido fosfórico al 50% en relación 2:1 y carbonización a 500 °C, permitió obtener un bioadsorbente con propiedades fisicoquímicas adecuadas (humedad 1,98% , cenizas 4,01%, densidad aparente 0,2462 g/ml), confirmando que la cáscara de plátano constituye un precursor viable para la producción de materiales adsorbentes debido a su composición lignocelulósica y grupos funcionales.

El análisis mediante ANOVA ($F=1800.755$; $p<0.001$) y la prueba de Tukey confirmaron que las diferencias observadas son estadísticamente significativas, permitiendo aceptar la hipótesis planteada.

Desde una perspectiva ambiental y tecnológica, estos hallazgos demuestran que es posible valorizar un residuo agroindustrial abundante en Ecuador, transformándolo en un material de alto valor agregado para el tratamiento de aguas superficiales.Esta aproximación promueve prácticas orientadas a la economía circular y ofrece una alternativa de bajo costo frente a los adsorbentes comerciales.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Guayaquil y a la Facultad de Ingeniería Química por facilitar los espacios, laboratorios y equipos para el desarrollo de la presente investigación, así como al laboratorio LAQUINS de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses que pudieran haber influido en la realización o presentación de este trabajo.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Cao A, Vilariño N, de Castro Alves L, Piñeiro Y, Rivas J, Botana AM, et al. Improving the effectiveness of safe cyanotoxin removal from drinking water using magnetic iron oxide nanoparticle-loaded carbon composites. Journal of Water Process Engineering 2025;75:107962. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107962.

[2] Gupta K, Soni N, Nema RK, Sahu N, Srivastava RK, Ratre P, et al. Microcystin-LR in drinking water: An emerging role of mitochondrial-induced epigenetic modifications and possible mitigation strategies. Toxicol Rep 2024;13:101745. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101745.

[3] Chorus I, Welker M. Toxic Cyanobacteria in Water. Toxic Cyanobacteria in Water 2021. https://doi.org/10.1201/9781003081449.

[4] Zhang W, Liu J, Xiao Y, Zhang Y, Yu Y, Zheng Z, et al. The Impact of Cyanobacteria Blooms on the Aquatic Environment and Human Health. Toxins (Basel) 2022;14:658. https://doi.org/10.3390/toxins14100658.

[5] Coloma Gavilanes JF, Labanda Lucero RA. Herramientas moleculares para la detección de cianobacterias potencialmente tóxicas en ecosistemas acuáticos del Río Daule. ESPOL; 2023.

[6] Hernán F, Castillo U, Luís J, Molina E, Lilia R, Merchán P, et al. Calidad de agua del río Daule en la periferia de la cabecera cantonal, noviembre - diciembre 2023. Revista Científica ARISTAS 2024;6:70–84. https://doi.org/10.5281/ZENODO.16340418.

[7] Ramutshatsha-Makhwedzha D, Mbaya R, Mavhungu ML. Application of Activated Carbon Banana Peel Coated with Al2O3-Chitosan for the Adsorptive Removal of Lead and Cadmium from Wastewater. Materials 2022, Vol 15, Page 860 2022;15:860. https://doi.org/10.3390/MA15030860.

[8] Bermeo SMB, Sánchez EYO, Calero LGV. Estudio de la bioadsorción de metales pesados (Pb y Cu) en las aguas del río Puyango, utilizando cáscara de naranja y plátano manzano. Ingeniería Química y Desarrollo -Universidad de Guayaquil 2022;4:11–20. https://doi.org/10.53591/iqd.v4i01.1475.

[9] Villa Sánchez FE. Evaluación de la capacidad adsorbente de la cáscara de naranja (Citrus sinensis) y coco (Cocos nucífera) para la remoción de metales pesados (Cr, Pb). UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO, 2022.

[10] Das K, Sukul U, Chen JS, Sharma RK, Banerjee P, Dey G, et al. Transformative and sustainable insights of agricultural waste-based adsorbents for water defluoridation: Biosorption dynamics, economic viability, and spent adsorbent management. Heliyon 2024;10:e29747. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E29747.

[11] Bakar NA, Othman N, Yunus ZM, Altowayti WAH, Al-Gheethi A, Asharuddin SM, et al. Nipah (Musa Acuminata Balbisiana) banana peel as a lignocellulosic precursor for activated carbon: characterization study after carbonization process with phosphoric acid impregnated activated carbon. Biomass Conversion and Biorefinery 2021 13:12 2021;13:11085–98. https://doi.org/10.1007/S13399-021-01937-5.

[12] Dar A, Rehman R, Hafeez M, ul-Ain N, Yaseen G, Anwar J, et al. Sequestration of cyanide ions from aqueous medium by physio-chemically fabricated biochar of peels of banana and grape fruit in ecofriendly way. Int J Phytoremediation 2024;26:1701–15. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2349721.

[13] Abuelnoor N, AlHajaj A, Khaleel M, Vega LF, Abu-Zahra MRM. Activated carbons from biomass-based sources for CO2 capture applications. Chemosphere 2021;282:131111. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131111.

[14] Neme I, Gonfa G, Masi C. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. Heliyon 2022;8:e11940. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11940.

[15] Younes K, Abdallah M, Hanna EG. The application of principal components analysis for the comparison of chemical and physical properties among activated carbon models. Mater Lett 2022;325:132864. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.132864.

[16] Al-sareji OJ, Grmasha RA, Meiczinger M, Al-Juboori RA, Somogyi V, Hashim KS. A Sustainable Banana Peel Activated Carbon for Removing Pharmaceutical Pollutants from Different Waters: Production, Characterization, and Application †. Materials 2024;17:1032. https://doi.org/10.3390/MA17051032/S1.

[17] Huang Y, Lenhart JJ. The dependence in microcystin removal with powdered activated carbon on variant properties, carbon properties, and dissolved organic matter. Chemosphere 2024;351:141205. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141205.

[18] Lewoyehu M. Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. J Anal Appl Pyrolysis 2021;159:105279. https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105279.

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 13/08/2026 · *Aceptado:* 16/09/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/qw21vv12

TOXOPLASMOSIS: UNA INFECCIÓN ZOONÓTICA GLOBAL, SUS MANIFESTACIONES CLÍNICAS Y ESTRATEGIAS DE MANEJO

TOXOPLASMOSIS: A GLOBAL ZOONOTIC INFECTION, ITS CLINICAL MANIFE STATIONS, AND MANAGEMENT STRATEGIES

[1] Jaime Javier Martínez Zambrano *	jaime.martinez@espoch.edu.ec
[1] Saul Santiago Tumbaco Salinas	saul.tumbaco@espoch.edu.ec

[1] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Carrera de Medicina Veterinaria, Riobamba, Ecuador.

E-mail: * jaime.martinez@espoch.edu.ec

RESUMEN

La toxoplasmosis es una zoonosis de distribución mundial causada por el protozoo intracelular obligado *Toxoplasma gondii*, cuyo ciclo biológico involucra a los felinos como hospederos definitivos y a diversas especies de mamíferos y aves como hospederos intermediarios. El presente artículo analiza el ciclo biológico del parásito, sus principales mecanismos de transmisión, la participación de los felinos en la eliminación de ooquistes y la contaminación ambiental, así como las manifestaciones clínicas, estrategias diagnósticas, tratamiento y medidas de prevención y control. La infección puede adquirirse principalmente mediante el consumo de carne cruda o insuficientemente cocida, la ingestión de ooquistes presentes en agua, suelo o alimentos contaminados y la transmisión transplacentaria. Mientras que en individuos inmunocompetentes suele ser asintomática o presentar manifestaciones leves y autolimitadas, en personas inmunodeprimidas, receptores de trasplantes y durante la gestación puede ocasionar formas clínicas graves. El tratamiento de las formas graves se basa principalmente en la combinación de pirimetamina, sulfadiazina y ácido folínico. Se concluye que la prevención de la toxoplasmosis requiere integrar medidas de higiene, seguridad alimentaria, manejo responsable de los felinos y reducción de la contaminación ambiental, bajo un enfoque de "Una Salud".

Palabras clave: *Toxoplasma gondii, toxoplasmosis, zoonosis, felinos, ooquistes, inmunosupresión.*

ABSTRACT

Toxoplasmosis is a worldwide zoonotic disease caused by the obligate intracellular protozoan Toxoplasma gondii, whose biological cycle involves felids as definitive hosts and various species of mammals and birds as intermediate hosts. This article analyzes the biological cycle of the parasite, its main transmission mechanisms, the role of felids in oocyst shedding and environmental contamination, as well as its clinical manifestations, diagnostic strategies, treatment, and prevention and control measures. Infection can be acquired mainly through the consumption of raw or undercooked meat, ingestion of oocysts present in contaminated water, soil, or food, and transplacental transmission. While infection in immunocompetent individuals is usually asymptomatic or presents with mild and self-limiting manifestations, it can cause severe clinical forms in immunocompromised individuals, transplant recipients, and during pregnancy. Treatment of severe forms is mainly based on the combination of pyrimethamine, sulfadiazine, and folinic acid. It is concluded that the prevention of toxoplasmosis requires the integration of hygiene measures, food safety, responsible management of cats, and reduction of environmental contamination under a One Health approach.

Keywords: *Toxoplasma gondii, toxoplasmosis, zoonosis, felids, oocysts, immunosuppression.*

Reciena Vol. 6 Núm. 2 (2026): 45 - 53

1. INTRODUCCIÓN

La toxoplasmosis se define como una zoonosis de alcance global, cuyo origen se atribuye al microorganismo *Toxoplasma gondii*, un protozoo parásito intracelular obligado capaz de infectar a cualquier vertebrado de sangre caliente, incluidos los seres humanos. Los felinos, tanto domésticos como salvajes, actúan como huéspedes definitivos del parásito al albergar su fase sexual y eliminar ooquistes no esporulados a través de sus heces al medio ambiente (1).

A nivel mundial, se estima una seroprevalencia media de *T. gondii* del 25,7 % (IC 95 %: 25,6 % - 25,8 %), aunque existen importantes diferencias entre regiones. Se han registrado valores promedio de 61,4% en África, 38,5 % en Oceanía, 31,2 % en Sudamérica, 29,6 % en Europa, 17,5 % en Estados Unidos y Canadá y 16,4 % en Asia, lo que evidencia la amplia distribución de esta parasitosis y la influencia de diferentes condiciones ambientales, climáticas, culturales y alimentarias sobre su transmisión (2).

La transmisión de *T. gondii* al ser humano ocurre principalmente mediante la ingestión de quistes tisulares presentes en carne cruda o insuficientemente cocida y por la ingestión de ooquistes presentes en agua, suelo o alimentos contaminados. También puede producirse transmisión vertical por vía transplacentaria durante la gestación y, con menor frecuencia, mediante transfusiones sanguíneas y trasplantes de órganos (3).

Toxoplasma gondii presenta especial importancia clínica debido a que la gravedad de la infección depende principalmente del estado inmunológico del huésped. En individuos inmunocompetentes, la infección primaria suele ser asintomática o manifestarse como un cuadro leve y autolimitado; sin embargo, en pacientes inmunodeprimidos, particularmente leve aquellos con VIH/SIDA o receptores de trasplantes, la reactivación de la infección puede producir formas graves como encefalitis toxoplásmica y enfermedad diseminada. Asimismo, la infección durante la gestación puede ocasionar toxoplasmosis congénita y provocar alteraciones neurológicas, oculares y viscerales en el feto (4).

Además de su importancia clínica, la toxoplasmosis constituye un problema de interés veterinario y ambiental debido a la participación de los felinos en la eliminación de ooquistes y a su posterior dispersión en el ambiente. La presencia de gatos domésticos, ferales y semidomésticos, así como sus hábitos de alimentación y contacto con fauna silvestre, puede favorecer la contaminación del suelo y el agua y contribuir al mantenimiento del ciclo de transmisión de *T. gondii* (1).

En este contexto, el conocimiento de los mecanismos de transmisión, las manifestaciones clínicas, las herramientas diagnósticas y las estrategias terapéuticas resulta fundamental para comprender la importancia de esta zoonosis y establecer medidas adecuadas de prevención y control. Por ello, el presente artículo tiene como objetivo analizar de manera integrada el ciclo biológico de *Toxoplasma gondii*, sus mecanismos de transmisión, las principales manifestaciones clínicas según el estado inmunológico del huésped, las herramientas diagnósticas y las estrategias terapéuticas y preventivas disponibles para el manejo de la toxoplasmosis.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Búsqueda de información bibliográfica

Para la elaboración del presente artículo se realizó una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, enfocada en recopilar información científica relacionada con la toxoplasmosis, su ciclo biológico, mecanismos de transmisión, fisiopatología, manifestaciones clínicas, diagnóstico, tratamiento y medidas de prevención. La búsqueda se efectuó a partir de artículos científicos y revisiones especializadas relacionadas con Toxoplasma gondii, considerando principalmente literatura científica publicada en revistas especializadas de parasitología, microbiología, infectología y medicina.

La información seleccionada permitió integrar aspectos relacionados con los diferentes estadios del parásito, la participación de los felinos como hospederos definitivos, la transmisión mediante ooquistes y quistes tisulares, así como las características clínicas de la infección en individuos inmunocompetentes e inmunodeprimidos. También se revisaron publicaciones enfocadas en la toxoplasmosis asociada con trasplantes, la infección congénita y la contaminación ambiental por ooquistes.

2.2. Criterios de selección de la información

Para la selección de las fuentes se consideró principalmente su pertinencia con los objetivos del artículo, actualidad, respaldo científico y relación directa con los aspectos epidemiológicos, biológicos, clínicos y terapéuticos de la toxoplasmosis. Se priorizaron artículos científicos publicados en revistas especializadas y revisiones de literatura que aportaran información sobre el ciclo biológico de *T. gondii*, sus mecanismos de infección, las manifestaciones clínicas y las estrategias diagnósticas y terapéuticas. Asimismo, se tomaron en consideración publicaciones que abordaran específicamente la participación de los gatos domésticos, ferales y semidomésticos en la eliminación

Reciena Vol. 6 Núm. 2 (2026): 45 - 53

de ooquistes y la contaminación del ambiente, debido a su importancia en la transmisión del parásito.

2.3. Sistematización y análisis de la información

Una vez recopilada la información, se realizó una lectura analítica y comparativa de las fuentes seleccionadas, organizando los datos de acuerdo con los principales componentes abordados en el artículo. La información fue clasificada en diferentes categorías: ciclo biológico y fisiopatología, mecanismos de transmisión, manifestaciones clínicas según el estado inmunológico, métodos diagnósticos, tratamiento y medidas de prevención y control.

Posteriormente, los contenidos fueron integrados de manera secuencial para facilitar la interpretación de la información y establecer relaciones entre el ciclo biológico del parásito, la participación de los felinos y las diferentes formas de presentación de la enfermedad. Los datos relevantes sobre los mecanismos de infección y la seroprevalencia en poblaciones felinas fueron organizados mediante tablas, mientras que la información clínica y terapéutica fue sintetizada mediante un análisis descriptivo de la literatura seleccionada.

3. RESULTADOS

3.1. Manifestaciones clínicas según el perfil del huésped

Las manifestaciones clínicas de la toxoplasmosis presentan diferencias importantes de acuerdo con el estado inmunológico del huésped. Mientras que en individuos inmunocompetentes la infección primaria suele ser asintomática o presentar síntomas leves y autolimitados, en pacientes inmunodeprimidos puede producirse una reactivación grave y potencialmente mortal (4).

Tabla 1. *Principales manifestaciones clínicas de la toxoplasmosis según el estado inmunológico del huésped*

Perfil del huésped	Características clínicas principales
Inmunocompetentes	Aproximadamente el 80-90% de las infecciones primarias son asintomáticas o subclínicas. Cuando aparecen manifestaciones clínicas, generalmente corresponden a un cuadro agudo y autolimitado caracterizado por fiebre, cefalea, mialgias y linfadenopatía cervical indolora. La principal manifestación focal puede ser la afectación ocular, incluyendo uveítis posterior y coriorretinitis.
Inmunodeprimidos	En pacientes con VIH/SIDA, receptores de trasplante de órganos sólidos (TOS) o de células madre hematopoyéticas (TCMH), la reactivación de la infección puede presentar una evolución grave y fulminante. La manifestación más característica es la encefalitis toxoplásmica, que puede producir fiebre, cefalea intensa, alteración del estado mental, déficits neurológicos focales, ataxia y convulsiones. También pueden presentarse complicaciones extracerebrales, como neumonitis grave.

Nota. *Información tomada de (4,5).*

3.2. Herramientas utilizadas para el diagnóstico

El diagnóstico de la toxoplasmosis requiere integrar diferentes herramientas de laboratorio, imagen e histopatología, cuya utilidad depende principalmente del estado inmunológico del paciente y de la presentación clínica. En conjunto, estas estrategias permiten identificar la respuesta inmunitaria frente al parásito, detectar su material genético y reconocer las alteraciones tisulares asociadas con la infección (1).

Tabla 2. *Principales herramientas utilizadas para el diagnóstico de la toxoplasmosis*

Herramienta diagnóstica	Características y utilidad
Laboratorio clínico	La evaluación de anticuerpos a partir de ensayos de inmunoenzimáticos (ELISA) determina la presencia de anticuerpos IgM e IgG y el perfil serológico de un paciente. La respuesta humoral es muy escasa en individuos inmunodeprimidos y, como consecuencia de ello, la identificación del ADN del parásito a través de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), y de forma especial en líquido cefalorraquídeo (LCR), sangre o tejidos, cobra mayor importancia desde un enfoque diagnóstico.
Diagnóstico por imagen	La resonancia magnética (RM) cerebral resulta ser un recurso esencial en aquellos casos en los que se presume un caso de neurotoxoplasmosis, dado que puede evidenciar diversas lesiones focales, preferentemente en la región de los ganglios basales o en el área de uniones corticomedulares; dentro de los hallazgos indicados, figura el "signo de la diana excéntrica", entendido como aquel hallazgo característico para las lesiones que están asociadas con neurotoxoplasmosis.
Histopatología	El estudio histopatológico permite identificar directamente las alteraciones producidas por el parásito. En procesos agudos pueden observarse taquizoítos, mientras que en fases crónicas pueden identificarse quistes tisulares. En los ganglios linfáticos se ha descrito una combinación de hiperplasia folicular, microgranulomas e hiperplasia de células B monocitoides.

Nota. *Información tomada de (5,6).*

3.2. Estadios parasitarios y ciclo biológico de Toxoplasma gondii

El ciclo biológico de T. gondii comprende diferentes formas parasitarias que participan en la transmisión, multiplicación y persistencia del microorganismo. Los felinos constituyen los hospederos definitivos, mientras que diferentes especies de mamíferos y aves actúan como hospederos intermediarios. Las formas de mayor importancia biológica corresponden a los esporozoítos, taquizoítos y bradizoítos (6).

Tabla 3. *Estadios parasitarios de Toxoplasma gondii.*

Estadio parasitario	Características principales
Esporozoítos	Se encuentran contenidos en los ooquistes eliminados al ambiente por los felinos. Después de la esporulación constituyen una forma infectante para los hospederos intermediarios.
Taquizoítos	Son formas de replicación rápida relacionadas principalmente con la fase aguda de la infección. Pueden diseminarse por diferentes tejidos mediante la invasión de células nucleadas.
Bradizoítos	Son formas de replicación lenta que permanecen agrupadas dentro de quistes tisulares. Se relacionan con la fase crónica o latente y pueden persistir durante largos períodos en los tejidos del hospedero.

Nota. *Información tomada de (7).*

El ciclo se inicia cuando un felino ingiere presas que contienen quistes tisulares con bradizoítos. Estos son liberados en el tracto digestivo y posteriormente invaden los enterocitos, donde se desarrolla la fase sexual del parásito. Como resultado de este proceso se forman ooquistes que son eliminados al ambiente mediante las heces, en condiciones adecuadas de temperatura y humedad, los ooquistes desarrollan su capacidad infectante y pueden contaminar agua, suelo y alimentos (7).

En los hospederos intermediarios, los esporozoítos liberados después de la ingestión de ooquistes se transforman en taquizoítos. Estas formas se multiplican rápidamente y se diseminan por vía sanguínea y linfática, como consecuencia de la respuesta inmunitaria, los taquizoítos pueden diferenciarse en bradizoítos y formar quistes tisulares, estableciendo una infección crónica y latente (7).

En individuos con inmunosupresión grave, los bradizoítos contenidos en los quistes pueden reactivarse y transformarse nuevamente en taquizoíto, esta reactivación favorece la diseminación del parásito hacia diferentes órganos y puede comprometer principalmente el sistema nervioso central, produciendo cuadros de encefalitis toxoplásmica (7).

3.4. Principales mecanismos de transmisión de Toxoplasma gondii

Entre los medios de propagación se ha establecido la ingesta de ooquistes a través de alimentos, agua o suelo contaminados, la ingestión de quistes tisulares presentes en carne cruda o insuficientemente cocida, la transmisión transplacentaria y, con menor frecuencia, la transmisión asociada con transfusiones sanguíneas y trasplantes de órganos (4).

Tabla 4. *Principales mecanismos de transmisión de Toxoplasma gondii.*

Forma parasitaria	Mecanismo de transmisión
Ooquistes	Ingestión de agua o alimentos contaminados, contacto con suelo contaminado y ausencia de higiene de manos después de actividades relacionadas con tierra o superficies contaminadas.
Quistes tisulares	Ingestión de carne cruda o semicruda que contiene bradizoítos. Se incluyen principalmente carnes de cordero, cerdo, cabra y, en menor medida, res, caballo, conejo y aves.
Taquizoítos	Transmisión transplacentaria, transfusiones sanguíneas y trasplantes de órganos. También se han descrito en diferentes fluidos biológicos, aunque su elevada susceptibilidad a las condiciones ambientales limita la transmisión horizontal por esta vía.

Nota. *Información tomada de (4,7).*

3.5. Participación de los gatos domésticos, ferales y semidomésticos

Los felinos tienen un papel fundamental en el ciclo de transmisión de *T. gondii,* debido a que constituyen los hospederos definitivos capaces de eliminar ooquistes al ambiente. Los gatos ferales permanecen principalmente en ambientes exteriores y tienen poco o ningún contacto con los seres humanos, mientras que los gatos semidomésticos corresponden a animales que han

tenido contacto con personas, pero que posteriormente fueron abandonados, se extraviaron o permanecen gran parte del tiempo fuera del domicilio (4).

Los gatos ferales y semidomésticos pueden contribuir a la contaminación de ambientes domésticos y silvestres mediante la eliminación de ooquistes. La presencia de estos animales alrededor de áreas productivas también se ha relacionado con la exposición de especies destinadas a la producción animal. Se ha observado, por ejemplo, una relación entre el incremento de poblaciones de gatos jóvenes alrededor de granjas y una mayor seroprevalencia de T. gondii en cerdos (4,8).

Seroprevalencia de Toxoplasma gondii en poblaciones felinas

La presencia de T. gondii ha sido documentada en poblaciones felinas domésticas, abandonadas, semidomesticadas y silvestres de diferentes regiones del continente americano. Los resultados muestran variaciones importantes según la población estudiada, la ubicación geográfica y el método diagnóstico empleado (4).

Tabla 5. *Seroprevalencia de T. gondii en gatos de diferentes poblaciones del continente americano*

Población	Tipo de población	Gatos positivos/evaluados	Método
San Pablo, Brasil	Pacientes en clínica veterinaria	119/163	Inmunofluorescencia indirecta
Bogotá, Colombia	Gatos abandonados	52/170	Aglutinación modificada
Ciudad de México, México	Gatos salvajes	4/6	Fijación de complemento
Panamá, Panamá	Gatos semidomesticados	110/241	Aglutinación directa
Victoria, Canadá	Pacientes en clínica veterinaria	16/63	Aglutinación directa
Columbia Británica, Canadá	Gatos domésticos	50/221	Inmunofluorescencia indirecta
Florida, Estados Unidos	Gatos salvajes	49/533	ELISA (IgG)
Illinois, Estados Unidos	Gatos de granjas de cerdos	223/295	Aglutinación directa
Población	Tipo de población	Gatos positivos/evaluados	Método

Nota. *Información tomada de (4).*

Además, se han descrito diferencias en la frecuencia de infección según la edad y las condiciones de exposición de los felinos. Los gatos jóvenes presentan especial importancia epidemiológica debido a que pueden experimentar su primera infección y eliminar ooquistes. Asimismo, la presencia de gatos con acceso al exterior favorece el contacto con presas potencialmente infectadas y, por consiguiente, la incorporación del parásito al ciclo doméstico y ambiental (4,8).

Contaminación ambiental por ooquistes

La contaminación ambiental constituye uno de los principales componentes epidemiológicos de la toxoplasmosis. Los ooquistes eliminados por los felinos pueden llegar al suelo y a fuentes de agua, desde donde pueden incorporarse a diferentes cadenas de transmisión. La magnitud de esta contaminación depende de factores como la cantidad de gatos presentes, su estado de infección, el acceso al exterior y las condiciones ambientales que favorecen la persistencia de los ooquistes. La densidad de las poblaciones felinas y las condiciones ambientales pueden modificar la probabilidad de eliminación de ooquistes. En este contexto, la presencia simultánea de poblaciones humanas y felinas constituye un factor relevante para comprender la distribución ambiental del parásito (2,4).

Estrategias para mitigar la contaminación ambiental

Las estrategias fundamentales orientadas a minimizar la contaminación comprenden restringir el libre tránsito de los gatos domésticos, limitar su capacidad de depredación sobre la fauna local, proporcionarles alimentación comercial, controlar su reproducción y realizar una adecuada eliminación de sus heces; también se recomienda recoger diariamente las heces de los areneros y mantener una adecuada higiene de estos espacios (4).

Para la población general, las medidas preventivas incluyen el lavado de manos después del contacto con tierra, el uso de guantes durante actividades de jardinería o agricultura y el adecuado manejo de alimentos y carnes. Estas medidas adquieren especial importancia en personas con inmunosupresión y durante el embarazo (8).

Tratamiento y estrategias terapéuticas

Tabla 6. *Esquema farmacológico utilizado en el tratamiento de la toxoplasmosis.*

Fármaco	Característica del tratamiento
Pirimetamina	Dosis de carga de 200 mg, seguida de 50-75 mg/día.
Sulfadiazina	1000-1500 mg cada 6 horas.
Ácido folínico (leucovorina)	5-25 mg/día, administrado conjuntamente para disminuir la toxicidad hematológica.
Trimetoprima-sulfametoxazol (TMP-SMX)	Alternativa terapéutica cuando existe intolerancia o hipersensibilidad al esquema convencional. También tiene utilidad como estrategia de profilaxis en determinados pacientes inmunodeprimidos.
Fármaco	Característica del tratamiento
Pirimetamina	Dosis de carga de 200 mg, seguida de 50-75 mg/día.
Sulfadiazina	1000-1500 mg cada 6 horas.
Ácido folínico (leucovorina)	5-25 mg/día, administrado conjuntamente para disminuir la toxicidad hematológica.

Nota. *Información tomada de (2,5,6).*

En pacientes inmunodeprimidos, el tratamiento oportuno adquiere especial importancia debido al riesgo de progresión hacia formas neurológicas y diseminadas. La prevención de la reactivación mediante estrategias de profilaxis también constituye un componente relevante del manejo de pacientes con alto riesgo.

4. DISCUSIÓN

La evidencia revisada muestra que la toxoplasmosis presenta un comportamiento clínico estrechamente relacionado con el estado inmunológico del huésped, Elmore et al. (4) señalan que en individuos inmunocompetentes la infección suele permanecer asintomática o manifestarse mediante signos inespecíficos y autolimitados, mientras que en pacientes con alteraciones de la inmunidad puede adquirir características mucho más graves. En correspondencia con ello, Adekunle et al. (2) afirmaron que los receptores de trasplante pueden presentar formas severas de toxoplasmosis, especialmente si hay reactivación de una infección previa. En su parte, Layton et al. (3) describieron que la toxoplasmosis severa puede encontrarse en huéspedes inmunocompetentes, y su versatilidad como expresión clínica puede conducir a que afecte preferentemente al sistema nervioso central. Todo ello justifica la pertinencia, considerando el perfil inmunológico de los pacientes para entender la evolución de la enfermedad.

Sánchez y Besteiro (8) explican que la capacidad de *Toxoplasma gondii* para producir enfermedad depende de múltiples factores relacionados con la virulencia del parásito, la invasión celular y la respuesta inmunitaria del huésped. Esta relación permite comprender por qué una misma infección puede permanecer controlada durante largos períodos o, bajo determinadas condiciones, progresar hacia formas graves. En este sentido, Attias et al. (7) describen que los taquizoítos constituyen la forma de multiplicación rápida responsable de la diseminación durante la fase activa, mientras que los bradizoítos permanecen en quistes tisulares y pueden mantenerse durante períodos prolongados. Dubey et al. (9) coinciden en que la transformación entre estas formas parasitarias constituye un elemento fundamental para comprender la persistencia y reactivación de la infección.

La respuesta inmunitaria también constituye un factor determinante en la evolución de la toxoplasmosis. Schanz et al. (10) destacan la participación de las células mieloides en los mecanismos de defensa frente a *T. gondii*, ampliando la comprensión de la respuesta inmunitaria involucrada en el control de la infección. De forma complementaria a lo que hemos mencionado, Sánchez y Besteiro (8) resaltan que la interacción de los mecanismos de virulencia del parásito y las respuestas defensivas del huésped determina en gran parte el establecimiento de la infección y el daño del tejido. De tal forma que, el permanecer el parásito no se puede considerar sólo por lo que se refiere a su biología, sino que también hay que tomar en consideración la interacción del propio patógeno y la respuesta del sistema inmunitario.

En relación con la transmisión, Tenter et al. (11) establecen que *T. gondii* puede alcanzar al ser humano mediante diferentes vías, entre ellas la ingestión de quistes tisulares presentes en carne insuficientemente cocida, el consumo de agua o alimentos contaminados con ooquistes y la transmisión congénita. Elmore et al. (4) resaltan además la importancia epidemiológica de los felinos como hospederos definitivos, debido a su capacidad para eliminar ooquistes al ambiente. Esta situación adquiere especial relevancia cuando se considera la presencia de gatos ferales y semidomésticos, ya que Gering et al. (8) demostraron que la infección por *T. gondii* puede modificar el comportamiento de determinados huéspedes silvestres

frente a los felinos, favoreciendo potencialmente las interacciones que mantienen el ciclo del parásito.

La contaminación ambiental es, por tanto, un elemento importante en la epidemiología de la toxoplasmosis. En este sentido, Zhu et al. (1) encontraron que la densidad de la población humana y las variaciones de temperatura podrían estar conectadas con la prevalencia de eliminación de los ooquistes en felinos tanto domésticos como silvestres. Lo que nos permite entender que la contaminación ambiental no tan solo depende de la existencia de gatos, sino que también intervienen las distintas variables ecológicas y demográficas que pueden potenciar la persistencia y la distribución del parásito. En la misma línea, las medidas preventivas deben tener el propósito de disminuir la exposición a las heces de gatos, de evitar que los gatos cacen o ingieran presas infectadas potencialmente infectadas, o continuar con la misma línea de conducta de fomentar el manejo adecuado de la tierra, agua y los alimentos.

La importancia de los animales domésticos y de producción dentro del ciclo epidemiológico también ha sido documentada. Jama y Yihun (12) evidenciaron la presencia de anticuerpos contra *T. gondii* en ovinos y señalaron su importancia zoonótica, particularmente debido al consumo de carne. Este resultado concuerda con lo que han dicho Tenter et al. (11), los cuales reconocen el consumo de carne cruda o poco cocinada como una de las rutas de transmisión más importantes al ser humano, y por lo tanto la prevención de la toxoplasmosis requiere no solo tener en cuenta la exposición ambiental a ooquistes sino también la seguridad alimentaria y las prácticas de manipulación y cocción de productos de origen animal que sean adecuadas.

Con relación a las manifestaciones clínicas, los resultados muestran que la diferencia entre inmunocompetentes e inmunodeprimidos es muy marcada. Elmore et al. (4) describen una presentación clínica generalmente leve en inmunocompetentes, mientras que Adekunle et al. (2) reportaron formas clínicas más graves en receptores de trasplantes. Robert-Gangneux et al. (5) igualmente alertaron sobre la importancia de la toxoplasmosis en receptores de trasplantes, donde la infección puede representar una complicación grave. Esta diferencia permite entender que el diagnóstico y el tratamiento incipientes adquieran un carácter especial en los pacientes inmunosuprimidos, aunque no presentan manifestaciones clínicas, por el momento.

La infección congénita constituye otro escenario de especial importancia debido a sus posibles consecuencias sobre el desarrollo fetal. Kota y Shabbir (13) señalan que la transmisión materno-fetal puede ocasionar manifestaciones de diferente gravedad, incluyendo alteraciones neurológicas y oculares, además de complicaciones que pueden aparecer posteriormente durante la vida. Estos hallazgos complementan lo señalado por Tenter et al. (11) respecto a la transmisión vertical y permiten considerar la toxoplasmosis congénita como una de las formas de infección en las que la prevención y el reconocimiento temprano tienen mayor relevancia.

En lo que respecta al tratamiento, la literatura revisada avala el uso de esquemas que buscan controlar la multiplicación activa del parásito, especialmente en las formas graves de la enfermedad. Rauwolf et al. (6) subrayan la necesidad de un diagnóstico y tratamiento precoces en pacientes trasplantados de células hematopoyéticas respecto a la posibilidad de fragilizar a estos pacientes e inducir enfermedad grave; Adekunle et al. (2) mostraron cómo la toxoplasmosis en receptores de un trasplante podría asociarse con un peor pronóstico clínico y por ello es necesario mantener la vigilancia en este grupo de pacientes. Por lo que la terapia que proporciona el tratamiento no debe ser tratada de forma aislada sino que debe integrarse dentro de una estrategia que incluya la identificación del riesgo, seguimiento clínico y prevención de la reactivación.

La investigación experimental también ha permitido explorar nuevas alternativas para el manejo de la enfermedad. El-Kady et al. (14) observaron que *Zingiber officinale* produjo efectos favorables frente a alteraciones asociadas con toxoplasmosis aguda en un modelo experimental en ratones. Sin embargo, estos resultados son los que se obtienen en un modelo animal y no permiten inferir que esta alternativa podría asemejarse a los tratamientos aplicados en personas. Lo que quiere decir que si bien los estudios experimentales son un punto que puede abordar la maduración de nuevas estrategias terapéuticas, todavía queda la necesidad de la existencia de suficiente evidencia clínica antes de entrar en la práctica habitual.

El control de la toxoplasmosis requiere de un enfoque global que relacione la salud humana, la salud animal y el medio ambiente. Elmore et al. (4) destacan la importancia epidemiológica de los felinos en el mantenimiento del ciclo del parásito, mientras que Zhu et al. (1) evidencian la influencia de factores ambientales y poblacionales sobre la eliminación de ooquistes. A esto se suma la importancia de la transmisión alimentaria descrita por Tenter et al.

(11) y la participación de animales de producción señalada por Jama y Yihun (12). En conjunto, estos hallazgos respaldan el enfoque de "Una Salud", en el cual la prevención de la toxoplasmosis no depende exclusivamente del tratamiento del paciente, sino también de la vigilancia de las poblaciones animales, la reducción de la contaminación ambiental, la higiene, la seguridad alimentaria y la educación de la población.

5. CONCLUSIONES

La toxoplasmosis puede definirse como una zoonosis con distribución cosmopolita cuyo comportamiento clínico depende fundamentalmente de la interacción de las propiedades del parásito y del estado inmunológico del hospedador. En las personas inmunocompetentes la infección transcurre asintomáticamente o con una leve clínica; sin embargo, en los inmunodeprimidos, los receptores de trasplantes y, por supuesto, durante el embarazo, la infección puede sentirse a través de manifestaciones clínicas graves, de ahí la importancia de la identificación precoz de la existencia de los grupos de riesgo.

El ciclo biológico de *Toxoplasma gondii* y la participación de los felinos como hospederos definitivos permiten entender la importancia epidemiológica que tienen los ooquistes en la contaminación ambiental. La eliminación de los ooquistes dependerá de factores relacionados con las poblaciones felinas y con factores ambientales, de donde se deduce que la prevención debe contemplar no sólo el manejo responsable de los gatos, sino el control de la contaminación del suelo, del agua y de los alimentos.

Las principales maneras de transmisión hacia el ser humano son el consumo de carne cruda o poco cocinada que contenga quistes tisulares, la ingesta oral de ooquistes provenientes de agua, suelo o alimentos contaminados y la transmisión materno-fetal. Por todo ello, las medidas de prevención han de hacer énfasis en la cocción adecuada de los productos cárnicos, la correcta higiene de manos, la manipulación segura de alimentos y el manejo adecuado de las heces del gato, en especial en mujeres embarazadas y en personas inmunodeprimidas.

En lo que respecta a la terapia, la combinación de pirimetamina, sulfadiazina y ácido folínico se mantiene como una de las más importantes alternativas terapéuticas que existen para las formas clínicas graves de la enfermedad, sobre todo cuando existe compromiso neurológico o un sujeto inmunodeprimido. En estos pacientes, una rehabilitación y un diagnóstico precoz, así como la vigilancia de aquellos grupos de riesgo mayor, son esenciales para el disminuir complicaciones y mortalidad asociadas a esta enfermedad.

El control de la toxoplasmosis requiere un enfoque integral de "Una Salud", debido a la estrecha relación entre la salud humana, animal y ambiental. La educación de los propietarios, el manejo responsable de los felinos, la prevención de la contaminación ambiental, la seguridad alimentaria y la vigilancia de poblaciones animales constituyen medidas esenciales para reducir la transmisión de *T. gondii* y su impacto zoonótico. Organización Mundial de la Salud.

6. AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) y a la Facultad de Ciencias Pecuarias por las facilidades institucionales y el apoyo institucional que han proporcionado para la elaboración del presente artículo. El mismo agradecimiento se hace extensivo al apoyo académico y científico en la fase de revisión y de análisis sobre la información disponible para la toxoplasmosis y su consecuente contribución al desarrollo del presente trabajo y de la divulgación de conocimientos sobre esta importante zoonosis desde un enfoque de "Una Salud".

7. CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Zhu S, VanWormer E, Shapiro K. More people, more cats, more parasites: human population density and temperature variation predict prevalence of Toxoplasma gondii oocyst shedding in free-ranging domestic and wild felids. PLoS One. 2023;18(6):e0286808. doi:10.1371/journal.pone.0286808.

2. Adekunle RO, Sherman A, Spicer JO, Messina JA, Steinbrink JM, Sexton ME, et al. Clinical characteristics and outcomes of toxoplasmosis among transplant recipients at two US academic medical centers. Transpl Infect Dis. 2021;23(4):e13636. doi:10.1111/tid.13636.

3. Layton J, Theiopoulou DC, Rutenberg D, Elshereye A, Zhang Y, Sinnott J, et al. Clinical spectrum, ra-

diological findings, and outcomes of severe toxoplasmosis in immunocompetent hosts: a systematic review. Pathogens. 2023;12(4):542. doi:10.3390/pathogens12040542.

4. Elmore SA, Jones JL, Conrad PA, Patton S, Lindsay DS, Dubey JP. Toxoplasma gondii: epidemiology, feline clinical aspects, and prevention. Trends Parasitol. 2010;26(4):190-196. doi:10.1016/j.pt.2010.01.009.

5. Robert-Gangneux F, Meroni V, Dupont D, Botterel F, Garcia JMA, Brenier-Pinchart MP, et al. Toxoplasmosis in transplant recipients, Europe, 2010-2014. Emerg Infect Dis. 2018;24(8):1497-1504. doi:10.3201/eid2408.171456.

6. Rauwolf KK, Floeth M, Kerl K, Schaumburg F, Groll AH. Toxoplasmosis following allogeneic hematopoietic stem cell transplantation: burden of disease and approaches for diagnosis, prevention and treatment in adults and children. Clin Microbiol Infect. 2021;27(3):378-388. doi:10.1016/j.cmi.2020.09.030.

7. Attias M, Teixeira DE, Benchimol M, Vommaro RC, Crepaldi PH, de Souza W. The life-cycle of Toxoplasma gondii reviewed using animations. Parasites Vectors. 2020;13:588. doi:10.1186/s13071-020-04445-z.

8. Gering E, Laubach ZM, Weber PSD, Soboll Hussey G, Lehmann KDS, Montgomery TM, et al. Toxoplasma infections are associated with costly boldness toward felids in a wild host. Nat Commun. 2021;12:3842. doi:10.1038/s41467-021-24092-x.

9. Dubey JP, Lindsay DS, Speer CA. Structures of Toxoplasma gondii tachyzoites, bradyzoites, and sporozoites and biology and development of tissue cysts. Clin Microbiol Rev. 1998;11(2):267-299. doi:10.1128/CMR.11.2.267.

10. Schanz ML, Bitters AM, Zadeii K, Joulani D, Chamberlain AK, López-Yglesias AH. IL-12 Mediates T-bet-Expressing Myeloid Cell-Dependent Host Resistance against Toxoplasma gondii. Immunohorizons. 2024;8(4):355-362. doi:10.4049/immunohorizons.2400029.

11. Tenter AM, Heckeroth AR, Weiss LM. Toxoplasma gondii: from animals to humans. Int J Parasitol. 2000;30(12-13):1217-1258. doi:10.1016/S0020-7519(00)00124-7.

12. Jama AM, Yihun TY. Seroprevalence of toxoplasmosis in sheep and its zoonotic importance in Hargeisa, Somaliland. Public Health Chall. 2025;4(1):e70035. doi:10.1002/puh2.70035. PMID:40496098.

13. Kota AS, Shabbir N. Congenital Toxoplasmosis. [Updated 2023 Jun 26]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. PMID:31424812.

14. El-Kady AM, Elshazly H, Alsulami MN, Albohiri HH, Alshehri EA, Alfaifi MS, et al. Zingiber officinale ameliorates acute toxoplasmosis-induced pathology in mice. Acta Parasitol. 2024;69(4):1785-1800. doi:10.1007/s11686-024-00884-1. PMID:39225734

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 29/07/2026 · *Aceptado:* 16/09/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/veje2d33

PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA COMO ESTRATEGIA DE AGROPRODUCCIÓN SOSTENIBLE EN EL CULTIVO DE TILAPIA EN PASTAZA

CLEANER PRODUCTION AS A SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTION STRATEGY FOR TILAPIA FARMING IN PASTAZA, ECUADOR

[1] Daysi Lorena Caiza López *	dl.caizal@uea.edu.ec
[2] Elsa Flor Ordoñez Bravo	elsa.ordonez@espoch.edu.ec
[3] Juan Carlos Caiza López	jc.caizal@uea.edu.ec
[4] Marco Andrés Quishpe Mejía	mquishpem5@unemi.edu.ec

[1] Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Medio Ambiente y Conservación, Puyo, Ecuador.

[2] Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Facultad de Salud Pública, Riobamba, Ecuador

[3] Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Planificacón y Evaluación, Puyo, Ecuador.

[4]Universidad Estatal de Milagro, Posgrado, Milagro, Ecuador.

E-mail: * michael.erazo@unach.edu.ec

RESUMEN

La tilapia (*Oreochromis niloticus*) es uno de los rubros más relevantes de las fincas familiares en la Amazonía ecuatoriana. Pese a su importancia, estos sistemas operan sin instrumentos técnicos que permitan monitorear el uso de recursos ni los desechos generados, lo que compromete su sostenibilidad. Ante ello, la investigación evaluó el comportamiento ambiental y la eficiencia en el uso de recursos del cultivo de tilapia en Pastaza, Ecuador, para diseñar estrategias de Producción Más Limpia aplicables a una agroproducción sostenible. La metodología fue de enfoque mixto, no experimental y transversal. La información se levantó en un estanque de la finca "Los Tres Chanchitos y Yo" (capacidad: 5.000 tilapias), mediante observación directa, entrevistas semiestructuradas al propietario y registro fotográfico. Con esa base se construyó el diagrama de flujo, se identificaron entradas y salidas de materiales, se elaboró el balance de materia y se efectuó el análisis económico del ciclo. El alimento balanceado absorbió el 61 % de los costos operativos y fue la mayor fuente de carga orgánica; el agua ingresó por flujo continuo desde el río Bobonaza sin medición alguna; los lodos removidos en la limpieza se descartaron sin aprovechamiento; y la inversión inicial se recuperó en cerca de 1,5 meses. Se concluye que existen oportunidades viables de mejora si se optimiza la alimentación, se controla el consumo de agua y se valorizan los lodos como compost, fortaleciendo la sostenibilidad de la piscicultura familiar.

Palabras clave: *Producción Más Limpia; tilapia; agroproducción; eficiencia de recursos; Amazonía ecuatoriana.*

ABSTRACT

Tilapia (*Oreochromis niloticus*) is one of the most important products of family farms in the Ecuadorian Amazon. Despite its importance, these systems operate without the technical tools needed to monitor resource use or the waste they generate, which puts their sustainability at risk. In response, this study assessed the environmental performance and resource-use efficiency of tilapia farming in Pastaza, Ecuador, in order to design Cleaner Production strategies applicable to sustainable agriproduction. The methodology followed a mixed-methods, non-experimental, cross-sectional approach. Data were collected at a pond on the "Los Tres Chanchitos y Yo" farm (capacity: 5,000 tilapia) through direct observation, semi-structured interviews with the owner, and photographic records. On that basis, a process flow diagram was built, material inputs and outputs were identified, a material balance was developed, and an economic analysis of the cycle was carried out. Balanced feed accounted for 61% of operating costs and was the main source of organic load; water flowed continuously from the Bobonaza River with no measurement whatsoever; sludge removed during cleaning was discarded without being put to use; and the initial investment was recovered in about 1.5 months. It is concluded that there are viable opportunities for improvement by optimizing feeding, controlling water consumption, and turning sludge into compost, thereby strengthening the sustainability of family-scale fish farming.

Keywords: *Cleaner Production; tilapia; agro-production; resource efficiency; Ecuadorian Amazon.*

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura se ha convertido en el sistema de producción de alimentos que más rápido crece en el mundo y hoy aporta más de la mitad del pescado que se consume a nivel global, lo que la sitúa como una pieza central de la seguridad alimentaria en países en desarrollo (1). Esta expansión responde a una demanda creciente de proteína animal de origen acuático, pero también trae consigo el reto de reducir su huella ambiental sin frenar su capacidad de generar ingresos y empleo en comunidades rurales, tal como lo señalan Troell et al. al analizar el aporte del sector a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2). En este contexto, se sostiene que el crecimiento de la piscicultura solo será sostenible en la medida en que se acompañe de mejoras en el manejo del agua, el alimento y los residuos generados durante el ciclo productivo, factores que determinan tanto la rentabilidad de las unidades piscícolas como su impacto sobre los cuerpos de agua receptores (3).

El cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*), por sus características de rusticidad y adaptación a distintos sistemas de manejo, se ha extendido en numerosas fincas familiares de pequeña y mediana escala en América Latina, entre ellas las ubicadas en la provincia de Pastaza. Esta forma de producción suele desarrollarse con recursos limitados y sin herramientas técnicas que permitan identificar con precisión los puntos del proceso donde se pierden materiales o se generan residuos, situación que ha sido documentada por (4) al estudiar la producción y comercialización de tilapia roja en el cantón Quevedo. Cuando estas debilidades no se corrigen, el resultado suele ser un uso ineficiente del alimento balanceado, un consumo elevado de agua y una acumulación de lodos sin ningún tipo de aprovechamiento, aspectos que además de representar una pérdida económica constituyen una fuente de contaminación para los ríos y quebradas que abastecen a estos sistemas productivos.

Frente a esta problemática, la Producción Más Limpia (PML) se ha consolidado como una estrategia preventiva que busca actuar sobre el origen de los residuos y no solo sobre su tratamiento final, integrando el uso eficiente de materia prima, agua y energía dentro del propio proceso productivo. Diversos estudios recientes confirman que esta estrategia genera beneficios simultáneos en los planos económico y ambiental. Las empresas informales que adoptan prácticas de eco eficiencia logran reducir su carga contaminante sin sacrificar su desempeño económico (5), mientras que se ha evidenciado que la implementación de PML en una pequeña empresa del sector metalmecánico permitió disminuir pérdidas de materiales y reutilizar agua en el proceso de fabricación (6). En un estudio de caso realizado en Pakistán(7) identificaron que la principal barrera para adoptar estas prácticas en países en desarrollo no es técnica sino de política pública y de acompañamiento institucional, un hallazgo relevante para unidades productivas familiares que, como la analizada en este estudio, operan sin apoyo técnico permanente. Por otro lado, en el contexto ecuatoriano, analizaron el impacto de la agroindustria en el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental del país, evidenciando que, si bien este sector aporta de manera significativa al Producto Interno Bruto, su expansión también genera contaminación del agua y degradación del suelo cuando no se acompaña de prácticas agrícolas sostenibles y tecnologías limpias (8). En la misma línea, un estudio de caso desarrollado en una finca agroindustrial de la Amazonía ecuatoriana mostró que la incorporación de manejo fitosanitario biológico, fertilización combinada con compost y biofertilizantes, y estrategias adecuadas de manejo postcosecha permite alcanzar niveles altos de rentabilidad sin comprometer la sostenibilidad del cultivo (9).

La aplicación de la PML en sistemas acuícolas resulta particularmente pertinente porque el alimento balanceado y el agua constituyen los principales flujos de entrada del proceso, mientras que los lodos y el agua de descarga representan las salidas de mayor potencial contaminante. Estudios explican que el reciclaje de nutrientes dentro de los sistemas de cultivo, mediante prácticas como el aprovechamiento de sedimentos orgánicos, puede reducir de forma significativa la dependencia de insumos externos y disminuir la presión sobre los cuerpos de agua receptores (10). En la misma línea, a partir de un análisis bibliométrico del sector acuícola, que la investigación sobre economía circular aplicada a la piscicultura ha acelerado de manera sostenible en los últimos tiempos, lo que refleja un interés creciente por transformar los residuos del cultivo en recursos aprovechables (11). Por su parte, investigadores plantean que la sostenibilidad de la acuicultura depende de aplicar un enfoque ecosistémico que considere de manera conjunta la escala del cultivo, el uso del agua y la capacidad de carga del entorno donde se desarrolla la actividad (12).

En Ecuador, la estrategia de PML ha sido aplicada principalmente en sectores agroindustriales y manufactureros, como lo muestra el caso de una microempresa láctea de la sierra centro norte del país, donde su implementación permitió identificar oportunidades concretas de mejora sin

requerir inversiones elevadas (13). Este mismo tipo de diagnóstico ha sido utilizado en otros rubros agroproductivos del país, como la tipificación de unidades bananeras orientada a mejorar el manejo agronómico y reducir pérdidas en la cadena de producción (14). Sin embargo, su aplicación específica al cultivo de tilapia en la Amazonía ecuatoriana ha sido escasamente documentada, a pesar de que las condiciones de manejo observadas en fincas piscícolas familiares de la región (uso continuo de agua de río, alimentación no ajustada a la biomasa real y disposición de lodos sin tratamiento) presentan un alto potencial de mejora bajo este enfoque.

Con base en lo expuesto, la presente investigación se justifica por la necesidad de disponer de conocimiento aplicado sobre el desempeño ambiental y económico del cultivo de tilapia en la provincia de Pastaza, así como de reconocer oportunidades de mejora desde el enfoque de Producción Más Limpia. Los resultados servirán de base para el diseño de estrategias de agroproducción sostenible acordes con las condiciones de la Amazonía ecuatoriana, con énfasis en la eficiencia en el uso de los recursos, la minimización de residuos y el aprovechamiento de subproductos, en favor de los productores locales y de la conservación del entorno ecológico.

Por lo expuesto, esta investigación tiene como objetivo general analizar el desempeño ambiental y la eficiencia en el uso de los recursos en el cultivo de tilapia en la provincia de Pastaza, Ecuador, como base para la formulación de estrategias de Producción Más Limpia. Para lograrlo, se plantean los siguientes objetivos específicos: diagnosticar el desempeño ambiental del proceso de producción de tilapia en la unidad piscícola seleccionada mediante la caracterización de los flujos de entrada y salida de materiales; evaluar la eficiencia en el uso del agua y del alimento balanceado durante el ciclo productivo, junto con la generación de residuos orgánicos del sistema de cultivo; y formular estrategias de Producción Más Limpia para la optimización del uso de los recursos, la reducción de pérdidas de materiales y el aprovechamiento de los subproductos generados en la unidad piscícola estudiada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló mediante un enfoque mixto, con predominio cualitativo y apoyo de información cuantitativa, bajo un diseño no experimental y de corte transversal. El estudio correspondió a una investigación descriptiva–propositiva, orientada a diagnosticar el desempeño ambiental del proceso de producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y a identificar oportunidades de aplicación de estrategias de Producción Más Limpia (PML) para optimizar el uso de recursos y minimizar la generación de residuos.

Este diseño es consistente con investigaciones de Producción Más Limpia, en las que el diagnóstico técnico del proceso constituye la base para la formulación de alternativas de prevención de la contaminación y optimización de procesos (15).

El procedimiento metodológico se estructuró tomando como referencia la metodología de Evaluación de Producción Más Limpia propuesta por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) adaptándola a las condiciones operativas de una unidad piscícola (16); esta metodología constituye el marco de referencia internacional más citado para el diagnóstico y la evaluación de oportunidades de PML en distintos sectores productivos (17).

2.2. Área de estudio

La investigación se realizó en la finca “Los Tres Chanchitos y Yo” como se muestra en la Figura 1, ubicada en la comunidad Talin, parroquia Veracruz, cantón Pastaza, provincia de Pastaza, Ecuador, en las coordenadas geográficas 1°32′03.8″ S, 77°50′46.6″ O. La unidad productiva está dedicada al cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y dispone de cinco estanques de cultivo que operan bajo un sistema escalonado de producción.



Figura 1. *Ubicación de la Finca “Los Tres Chanchitos y Yo” tomado de Google Earth Pro, 2026.*

Durante el reconocimiento inicial se realizó la caracterización de los cinco estanques con el propósito de comprender el funcionamiento integral de la unidad piscícola. Sin embargo, para el desarrollo del diagnóstico de Producción Más Limpia y la evaluación técnico-económica se seleccionó como caso de estudio un estanque representativo con capacidad para 5.000 tilapias, debido a que permitió documentar de forma completa las diferentes etapas del proceso productivo durante un ciclo de cultivo de aproximadamente cinco meses.

La selección del caso de estudio respondió a un criterio de representatividad técnica, considerando que el estanque comparte las mismas condiciones de infraestructura, abastecimiento de agua, manejo operativo, alimentación y comercialización que el resto de la unidad productiva.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información

La información primaria fue obtenida mediante técnicas de observación directa, entrevistas semiestructuradas dirigidas al propietario de la unidad piscícola y registro fotográfico de las actividades desarrolladas durante el proceso productivo. Para la recopilación de datos se emplearon instrumentos como una ficha de observación técnica, una guía de entrevista semiestructurada, libreta de campo, cinta métrica para la verificación de las dimensiones de los estanques y un dispositivo móvil para el registro visual de las condiciones operativas. La observación directa permitió caracterizar las diferentes etapas del cultivo de tilapia, considerando aspectos como la infraestructura disponible, el sistema de captación y conducción del agua proveniente del río Bobonaza, el manejo del alimento balanceado, las actividades de cosecha y las prácticas de limpieza y mantenimiento de los estanques.

Igualmente, las entrevistas semiestructuradas permitieron recopilar información relacionada con la adquisición de alevines, prácticas de alimentación, consumo de insumos, costos operativos, niveles de producción, procesos de comercialización y gestión de los residuos generados durante el ciclo productivo. Como complemento, se llevó a cabo un registro fotográfico que sirvió como evidencia documental de las condiciones reales bajo las cuales opera la unidad piscícola, y que además permitió representar gráficamente el proceso a través de la elaboración del diagrama de flujo. Por último, los datos recolectados fueron organizados, sistematizados y procesados con la herramienta Microsoft Excel, lo que posibilitó estructurar la información necesaria para analizar el proceso productivo y detectar oportunidades de mejora en el marco de la Producción Más Limpia.

2.4. Procedimiento metodológico

La investigación se desarrolló mediante seis fases metodológicas.

Fase 1. Reconocimiento y caracterización del sistema productivo

Se efectuó una visita técnica a la finca con el propósito de conocer la organización del sistema productivo. Durante el recorrido se caracterizaron los cinco estanques de cultivo, identificando las condiciones de infraestructura, el abastecimiento de agua, las etapas del ciclo productivo, el manejo alimenticio y las actividades de mantenimiento. Posteriormente se seleccionó un estanque representativo de 5.000 tilapias como caso de estudio para el análisis detallado.

Fase 2. Caracterización de las operaciones del proceso

Con base en la información obtenida durante el trabajo de campo se identificaron las operaciones que conforman el sistema productivo, registrando la secuencia de actividades desarrolladas desde la preparación del estanque hasta la comercialización del producto. Este tipo de descripción sistemática y documental del proceso productivo, previa a la aplicación de estrategias de PML, ha sido empleada en diagnósticos ambientales realizados en unidades productivas ecuatorianas (18).

Para cada operación se identificaron los recursos utilizados, los insumos empleados y los productos, subproductos y residuos generados, información que posteriormente permitió construir el diagrama de flujo del proceso.

Fase 3. Identificación y cuantificación de entradas y salidas

Posteriormente se identificaron los flujos de materiales presentes en cada etapa del proceso productivo mediante observación directa, entrevistas y revisión de la información disponible en la unidad piscícola.

Durante esta fase se registró información relacionada con el abastecimiento de agua, incorporación de alevines, utilización de alimento balanceado, producción de biomasa y generación de residuos, especialmente agua de descarga, restos de alimento

y lodos provenientes de la limpieza de los estanques. Los datos recopilados constituyeron la base para la elaboración posterior del balance de materia del sistema productivo.

Fase 4. Diagnóstico de Producción Más Limpia

A partir de la información recopilada se realizó un diagnóstico ambiental del proceso productivo con el propósito de identificar puntos críticos asociados al consumo de recursos naturales y a la generación de residuos, en línea con los diagnósticos de valorización y gestión de residuos aplicados en unidades agroindustriales peruanas (15).

El análisis se centró en la eficiencia del uso del agua, el manejo del alimento balanceado y la gestión de los lodos generados durante el mantenimiento de los estanques, determinando las principales fuentes de pérdidas de materiales y oportunidades de mejora ambiental.

Fase 5. Análisis económico del ciclo productivo

De manera complementaria al diagnóstico ambiental, se realizó un análisis económico del sistema de producción con el propósito de determinar la inversión inicial requerida, los costos operativos del ciclo de cultivo y los principales indicadores de rentabilidad del proceso. Para establecer el costo unitario de producción, se dividió el costo operativo total del ciclo entre las libras estimadas de producción. La utilidad operativa, por su parte, se obtuvo al descontar el costo operativo total de los ingresos brutos generados por la venta de la biomasa cosechada. En cuanto al periodo de recuperación de la inversión inicial, este se calculó dividiendo dicho monto de inversión entre el promedio mensual de utilidad operativa, el cual se determinó a partir de la utilidad total del ciclo dividida para los meses que este duró. Estos indicadores contribuyeron a complementar el diagnóstico técnico con una base económica que sirviera de sustento para la identificación posterior de oportunidades de mejora.

Fase 6. Procesamiento y análisis de la información

Las oportunidades de Producción Más Limpia fueron identificadas mediante el análisis integrado de la información obtenida durante el diagnóstico técnico y el análisis económico, considerando los principios de prevención de la contaminación, eficiencia en el uso de recursos y valorización de residuos (17).

Las alternativas propuestas fueron evaluadas mediante criterios de factibilidad técnica, viabilidad económica, beneficio ambiental, facilidad de implementación y potencial de aprovechamiento de los subproductos generados durante el proceso productivo, siguiendo esquemas de evaluación de estrategias de PML aplicados en procesos productivos ecuatorianos de otros sectores (19).

Con la información procesada en las fases anteriores se elaboraron el diagrama de flujo del proceso, el balance de materia y la matriz de oportunidades de Producción Más Limpia, herramientas que permitieron evaluar el desempeño ambiental y económico de la unidad piscícola e identificar alternativas de mejora para incrementar la ecoeficiencia del sistema de producción.

La lectura de los resultados se apoyó en la caracterización de las operaciones del proceso, la evaluación de los flujos de materiales, el análisis económico del ciclo productivo y la detección de oportunidades de mejora ambiental. Sobre esta base, fue posible plantear estrategias dirigidas a optimizar el uso de los recursos, disminuir las pérdidas de materiales y aprovechar los lodos que se generan durante el cultivo de tilapia.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de la unidad piscícola

Durante la visita técnica realizada a la finca “Tres Chanchitos”, ubicada en la comunidad Talin, parroquia Veracruz, provincia de Pastaza, se efectuó el reconocimiento del sistema de cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*). La unidad productiva estuvo conformada por cinco estanques que operaban bajo un sistema escalonado de producción, lo que permitía mantener diferentes etapas del ciclo productivo y disponer continuamente de peces para su comercialización.

Para el desarrollo del caso de estudio se seleccionó un estanque representativo con capacidad para 5.000 tilapias, cuyas dimensiones fueron de 5,0 m de longitud, 3,0 m de ancho y 1,20 m de profundidad. El estanque fue construido en tierra y presentó revestimiento con geomembrana únicamente en los taludes laterales, mientras que el fondo permanecía en suelo natural compactado. El abastecimiento de agua se realizó mediante conducción continua desde el río Bobonaza, garantizando la renovación permanente del recurso hídrico durante el ciclo de cultivo.

Tabla 1. *Características del estanque seleccionado como caso de estudio.*

Característica	Descripción
Especie	*Oreochromis niloticus*
Capacidad	5.000 alevines
Dimensiones	5,0 × 3,0 × 1,20 m
Tipo de estanque	Tierra con geomembrana lateral
Fuente de agua	Río Bobonaza
Sistema hidráulico	Flujo continuo
Duración del ciclo	5 meses
Mortalidadestimada	20 %

3.2. Descripción del proceso productivo

El proceso productivo inició con la adquisición de 5.000 alevines, adquiridos a proveedores privados especializados, con un costo unitario aproximado de USD 0,05, debido a que, según el propietario, presentan mejores índices de supervivencia que los distribuidos por otras instituciones públicas.

Durante la primera semana de cultivo se suministró un complejo vitamínico para favorecer la adaptación de los alevines y disminuir el estrés fisiológico ocasionado por el transporte. Posteriormente, la alimentación se desarrolló de acuerdo con el crecimiento de los peces utilizando alimento balanceado comercial de la línea Fishpac®. En el primer mes se empleó Fishpac® 32 % de proteína; durante los meses segundo y tercero se utilizó Fishpac® 28 %; mientras que en los meses cuarto y quinto se suministró Fishpac® 24 %, correspondiente a la etapa de engorde.

Al concluir aproximadamente cinco meses de cultivo, las tilapias alcanzaron un peso comercial cercano a una libra por individuo. Finalizada la cosecha, el estanque fue drenado para efectuar las labores de limpieza, observándose que los lodos sedimentados eran retirados manualmente y depositados en las inmediaciones de la finca, sin evidenciarse prácticas de aprovechamiento o valorización.

Etapa	Tiempo	Alimento	Proteína (%)	Cantidad	Costo (USD)
Adaptación	Primera semana	Complejo vitamínico	—	1 tratamiento	35,00
Inicio	Primer mes	Fishpac® 32	32	1 quintal	45,00
Crecimiento	Meses 2 y 3	Fishpac® 28	28	8 quintales	304,00
Engorde	Meses 4 y 5	Fishpac® 24	24	22 quintales	807,40
Total	**5 meses**			**31 quintales**	**1.191,40**

Tabla 2. *Programa de alimentación observado durante el ciclo de cultivo*

3.3. Diagrama de flujo del proceso de cultivo de tilapia

Con base en la información recopilada durante la visita técnica y las entrevistas realizadas al propietario, se identificaron las principales operaciones que conforman el proceso de cultivo de tilapia en la unidad productiva. El proceso inicia con la preparación del estanque, continúa con la siembra de los alevines, el suministro de vitaminas y alimento balanceado durante las diferentes etapas de crecimiento, hasta finalizar con la cosecha y la limpieza del estanque (Figura 2).

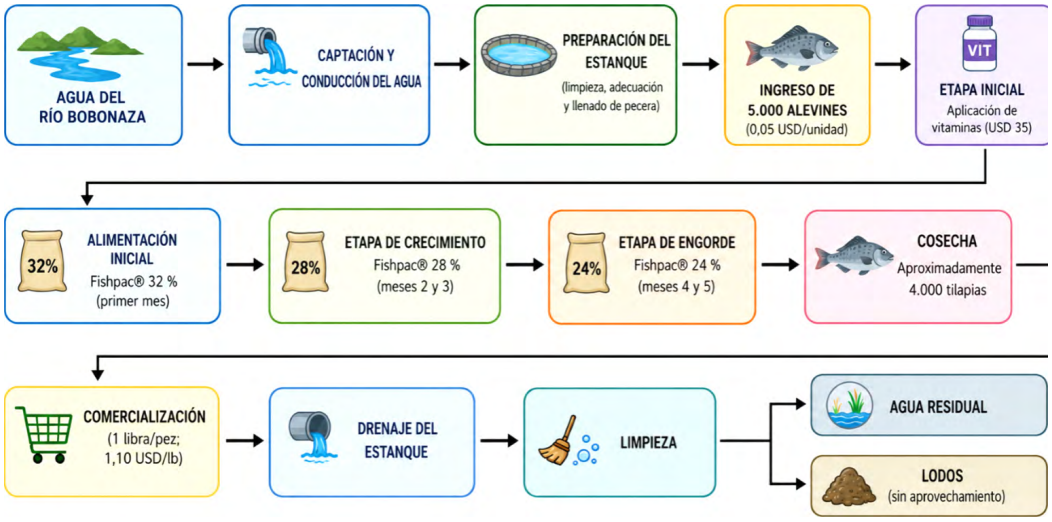


Figura 2. *Diagrama de flujo del proceso de cultivo de tilapia en la finca "Tres Chanchitos"*

3.4. Identificación de entradas y salidas del proceso productivo

La identificación de entradas y salidas de la Tabla 3 permitió establecer los puntos donde ocurre el consumo de recursos y la generación de residuos dentro del proceso de cultivo. Esta evaluación permitió relacionar cada operación productiva con los recursos empleados y los impactos ambientales asociados.

Tabla 3. *Identificación de entradas y salidas por etapa del proceso.*

Etapa del proceso	Entradas	Salidas
Preparación del estanque	Agua, infraestructura, mano de obra	Estanque acondicionado
Siembra	Alevines de tilapia	Peces en adaptación
Adaptación	Vitaminas, agua	Peces adaptados al sistema
Alimentación inicial	Fishpac® 32 %	Incremento de biomasa, residuos orgánicos
Crecimiento	Fishpac® 28 %	Biomasa de juveniles, excretas
Engorde	Fishpac® 24 %	Tilapia comercial, materia orgánica
Cosecha	Mano de obra	4.000 peces comercializables
Limpieza del estanque	Agua, mano de obra	Agua residual y lodos

3.5. Balance de materia del sistema productivo

El balance de materia de la Tabla 4 fue desarrollado considerando un ciclo productivo aproximado de cinco meses para un estanque con capacidad de 5.000 tilapias. Se analizaron las principales entradas del sistema, conformadas por recursos naturales, materias primas e insumos, y las salidas generadas durante el proceso productivo.

Las entradas principales correspondieron al agua proveniente del río Bobonaza, alevines, alimento balanceado y suplementos vitamínicos. Por otra parte, las salidas estuvieron representadas por la biomasa comercial obtenida, mortalidad, agua residual, restos de alimento y lodos generados durante la limpieza del estanque.

Tabla 4. *Balance de materia del cultivo de tilapia durante un ciclo productivo.*

Flujo del sistema	Entrada	Cantidad estimada	Salida	Cantidad estimada
Material biológico	Alevines	5.000 unidades	Tilapia cosechada	4.000 unidades
Mortalidad	—	—	Peces muertos	1.000 unidades
Alimentación	Fishpac® 32 %	1 quintal	Biomasa generada	Incluida en producción
Alimentación	Fishpac® 28 %	8 quintales	Restos de alimento	No cuantificado
Alimentación	Fishpac® 24 %	22 quintales	Materia orgánica sedimentada	No cuantificada
Suplementación	Vitaminas	35 USD/ciclo	—	—
Recurso hídrico	Agua del río Bobonaza	Flujo continuo	Agua de descarga	Flujo continuo

El balance evidenció que el alimento balanceado constituye la principal entrada de materia al sistema después del agua, mientras que los residuos orgánicos acumulados en el estanque representan el principal flujo potencial de aprovechamiento mediante estrategias de Producción Más Limpia.

3.6. Diagnóstico del proceso desde el enfoque de Producción Más Limpia

La caracterización del proceso permitió identificar tres aspectos ambientales prioritarios. En primer lugar, el alimento balanceado constituyó el principal componente del costo operativo, representando aproximadamente el 61% de los costos de producción, lo que evidencia que pequeñas mejoras en la eficiencia de alimentación podrían reducir simultáneamente los costos y la carga contaminante asociada a los restos de alimento.

En segundo lugar, se constató que el abastecimiento de agua se realiza mediante flujo continuo desde el río Bobonaza, condición que garantiza condiciones adecuadas para el cultivo, pero que hace necesario evaluar alternativas para optimizar el uso del recurso hídrico y disminuir las pérdidas de agua durante la operación del sistema.

Finalmente, durante la limpieza del estanque se observó la generación de lodos provenientes de la acumulación de materia orgánica y sedimentos. Estos residuos eran retirados y depositados en áreas cercanas a la unidad productiva sin ningún tipo de aprovechamiento, identificándose una

oportunidad para su valorización mediante su utilización como acondicionador de suelos o materia prima para la elaboración de compost, en concordancia con los principios de la Producción Más Limpia.

3.7. Análisis económico del ciclo productivo

El análisis económico del sistema de producción de tilapia permitió determinar la inversión inicial requerida para la adecuación de la infraestructura productiva, así como los costos asociados al desarrollo de un ciclo de cultivo y los principales indicadores de rentabilidad del proceso. El cálculo tomó en cuenta los recursos empleados en la construcción y el acondicionamiento del estanque, entre ellos las labores de excavación, la colocación de geomembrana, la instalación del sistema de conducción de agua y los accesorios hidráulicos. Asimismo, se incluyeron los costos operativos asociados a la compra de alevines, el alimento balanceado, los suplementos vitamínicos y la mano de obra, de acuerdo con las condiciones de operación informadas por el propietario de la unidad piscícola.

A partir de los datos productivos estimados se determinó la producción esperada, los ingresos generados por la comercialización de la biomasa cosechada, la utilidad operativa, el costo unitario de producción y el periodo estimado de recuperación de la inversión inicial. El periodo de recuperación se calculó dividiendo el monto de la inversión inicial entre la utilidad operativa mensual promedio, obtenida a partir de la utilidad total generada durante el ciclo de cultivo. Estos indicadores permitieron evaluar el desempeño económico del sistema piscícola y establecer una base técnica para la identificación de alternativas de optimización bajo el enfoque de Producción Más Limpia. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. *Inversión inicial, costos operativos e indicadores productivos-económicos estimados del ciclo de cultivo de tilapia.*

Inversión inicial y costos operativos	Valor (USD)	Indicadores productivos y económicos	Valor
Inversión inicial		**Indicadores productivos**	
Excavación del estanque	250,00	Alevines sembrados	5.000 individuos
Geomembrana lateral	250,00	Mortalidad estimada	20 %
Instalación de geomembrana	100,00	Peces cosechados	4.000 individuos
Sistema de conducción de agua	120,00	Producción estimada	4.000 lb
Accesorios hidráulicos	50,00	Peso promedio individual	1 lb/pez
Total inversión inicial	**770,00**	**Indicadores económicos**	
Costos operativos del ciclo		Precio de venta	1,10 USD/lb
Compra de 5.000 alevines	250,00	Ingreso bruto estimado	4.400,00 USD
Complejo vitamínico	35,00	Costos operativos	1.891,40 USD
Fishpac® 32	45,00	Utilidad operativa estimada	2.508,60 USD
Fishpac® 28	304,00	Costo de producción	0,47 USD/lb
Fishpac® 24	807,40	Recuperación de inversión inicial	1,5 meses
Mano de obra	450,00		
Costo operativo total	**1.891,40**		

3.8. Matriz de oportunidades de Producción Más Limpia

A partir del diagnóstico realizado mediante el diagrama de flujo, balance de materia e identificación de entradas y salidas, se determinaron oportunidades de mejora orientadas a prevenir pérdidas de recursos, reducir residuos y mejorar la eficiencia productiva del cultivo de tilapia (Ver Tabla 6).

Tabla 6. *Matriz de oportunidades de Producción Más Limpia identificadas.*

Aspecto identificado	Situación actual	Estrategia de Producción Más Limpia	Resultado esperado
Uso del alimento balanceado	Representa el mayor costo operativo del cultivo	Ajustar la cantidad suministrada según biomasa y consumo real de los peces	Reducción del desperdicio de alimento y disminución de costos
Manejo del agua	Ingreso continuo desde el río Bobonaza sin medición del consumo	Implementar control del caudal y seguimiento de parámetros fisicoquímicos	Optimización del uso del recurso hídrico
Generación de lodos	Retiro y disposición sin aprovechamiento	Implementar procesos de valorización mediante compostaje o uso agrícola	Transformación de residuos en subproductos aprovechables
Mortalidad del cultivo	Pérdida aproximada del 20 % de los peces sembrados	Mejorar prácticas de adaptación, manejo sanitario y seguimiento del cultivo	Incremento de la supervivencia y productividad
Registro productivo	Ausencia de indicadores sistemáticos	Implementar registros de consumo, mortalidad, alimentación y producción	Mejor toma de decisiones basada en indicadores

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la finca "Los Tres Chanchitos y Yo" confirman un patrón ampliamente documentado en la literatura reciente sobre acuicultura de tilapia: el alimento balanceado constituye el componente que concentra la mayor proporción del gasto operativo y, por tanto, el punto donde una mejora en la eficiencia productiva genera el mayor impacto simultáneo sobre costos y contaminación. El uso de alimento en la acuicultura implica cantidades considerables de tierra, agua dulce, energía y pescado silvestre incorporados de forma indirecta al proceso, y un mejor manejo del alimento orientado a reducir la tasa de conversión alimenticia constituye la vía más efectiva para disminuir el uso de recursos a nivel de finca(20). Este planteamiento coincide con lo observado en el estanque estudiado, donde el 61% de los costos de producción correspondió a alimento, un porcentaje que confirma que pequeños ajustes en la ración suministrada, más que cambios estructurales en el sistema, tienen el mayor potencial de mejora. Esta lectura se ve reforzada por evidencia que indica que, de los nutrientes totales suministrados a los estanques de cultivo, solo un 30% se convierte efectivamente en producto, mientras que el resto se descarga al ambiente para mantener la calidad del agua(21), lo que sugiere que buena parte del alimento no consumido termina como carga orgánica en el sistema, tal como se documentó en el balance de materia de la Tabla 4.

En cuanto al manejo del recurso hídrico, el abastecimiento por flujo continuo desde el río Bobonaza, aunque garantiza condiciones estables para el cultivo, se aleja de las recomendaciones de eficiencia hídrica que plantea la literatura especializada. Los sistemas integrados de acuicultura y agricultura basados en estanques han demostrado beneficios sociales, económicos y ambientales considerables cuando se acompañan de una regulación adecuada del consumo de agua, y pueden contribuir a la productividad, al ingreso de los productores y a la fertilidad del suelo cuando el recurso se gestiona con criterios técnicos en lugar de dejarse en flujo libre(22). En la misma línea, se ha documentado en estanques de tilapia roja que las concentraciones de compuestos nitrogenados en el agua pueden incrementarse de forma marcada hacia el final del ciclo de cultivo(23), lo que evidencia que la ausencia de control sobre el caudal y los parámetros fisicoquímicos, como ocurre en la finca estudiada, puede derivar en un deterioro progresivo de la calidad del agua que pasa inadvertido si no existe un monitoreo sistemático.

La generación de lodos sin aprovechamiento, identificada como uno de los tres aspectos ambientales prioritarios del diagnóstico, encuentra amplio respaldo en la bibliografía sobre valorización de residuos acuícolas. La economía biocircular en acuicultura se ha descrito como la incorporación de biomasa y biotecnologías para lograr sostenibilidad(24), un marco conceptual que coincide con la propuesta formulada en la matriz de oportunidades de este estudio para transformar los lodos sedimentados en acondicionador de suelos. Existe además evidencia experimental directa sobre esta posibilidad, al demostrarse que el compostaje y el vermicompostaje de lodos de pescado combinados con otros residuos orgánicos permiten obtener un producto seguro y rico en nutrientes disponibles para las plantas (25). De manera similar, se ha propuesto un sistema de producción sin residuos que integra estanques de cultivo, cultivo de hortalizas y compostaje dentro de un mismo flujo circular (26), un modelo que podría adaptarse a la escala de la unidad piscícola estudiada dado que ya comparte varias de sus condiciones de infraestructura y manejo.

El análisis económico, con una recuperación de la inversión inicial de 1,5 meses, resulta notablemente más rápido que los periodos reportados en estudios comparables de cultivo de tilapia en pequeña y mediana escala. La rentabilidad de granjas de tilapia en tanques varía según el tamaño de la operación, con tasas internas de retorno crecientes a medida que aumenta el número de unidades de cultivo (27), lo que indica que las economías de escala inciden directamente sobre la velocidad de recuperación del capital. Asimismo, se ha evaluado un sistema de acuicultura de traspatio de baja inversión orientado a comunidades rurales, concluyendo que este tipo de sistemas puede ser rentable cuando se ajustan correctamente los parámetros productivos(28), un hallazgo que respalda la viabilidad del modelo observado en Talin, Veracruz. En un contexto de mayor escala, se determinó que la producción de tilapia bajo tecnología de biofloc mantiene un margen neto positivo en la mayoría de los escenarios evaluados, con la excepción del escenario pesimista (29), lo que confirma que la rentabilidad del cultivo de tilapia depende en gran medida de mantener controlados los costos de alimentación y de fingerlings, tal como ocurrió en el caso analizado.

Finalmente, la mortalidad estimada del 20% durante el ciclo productivo merece una lectura crítica a la luz de la literatura sobre sanidad en tilapicultura. La intensificación del cultivo de tilapia favorece la aparición de enfermedades bacterianas asociadas a

altas concentraciones de nutrientes, temperaturas elevadas y densidades de siembra crecientes(30), condiciones que coinciden parcialmente con el manejo observado en el estanque de estudio. El peso económico de este tipo de pérdidas ha sido cuantificado al demostrarse que, en granjas donde la mortalidad asociada a enfermedades bacterianas supera el 10%, resulta rentable invertir en alevines con mayor resistencia genética incluso pagando un sobreprecio considerable por ellos(31), lo que sugiere que la mortalidad del 20% registrada en la finca representa no solo una pérdida biológica sino una oportunidad concreta de mejora económica mediante prácticas sanitarias más rigurosas o proveedores de alevines de mejor calidad genética. En un análisis de eficiencia de recursos en cultivo de peces de agua cálida, se encontró que el alimento concentra la mayor parte del consumo energético del sistema productivo(32), lo que refuerza la idea de que las intervenciones dirigidas a mejorar la conversión alimenticia y reducir la mortalidad tienen efectos que se multiplican entre sí, mejorando simultáneamente la eficiencia productiva, el desempeño ambiental y la rentabilidad del cultivo.

En su conjunto, estos antecedentes permiten confirmar que los tres aspectos detectados en el diagnóstico de Producción Más Limpia: el manejo del alimento, la gestión del agua y el aprovechamiento de los lodos; no constituyen hallazgos aislados del presente estudio, sino que representan problemas estructurales y recurrentes de la piscicultura de pequeña escala, documentados en diversos contextos geográficos. Esto refuerza la solidez de las estrategias planteadas en la matriz de oportunidades.

5. CONCLUSIONES

El diagnóstico realizado en la finca "Los Tres Chanchitos y Yo" mostró que el cultivo de tilapia en esta unidad piscícola de Pastaza funciona con un manejo empírico, sostenido en la experiencia del propietario más que en registros técnicos o controles sistemáticos. El diagrama de flujo y el balance de materia permitieron identificar con claridad los puntos donde se concentra el consumo de recursos y la generación de residuos: el alimento balanceado, el agua de conducción continua desde el río Bobonaza y los lodos que quedan después de cada cosecha. Ninguno de estos tres elementos contaba con algún tipo de control o aprovechamiento antes de este estudio, lo que confirma que el sistema tiene un margen amplio de mejora sin necesidad de cambios estructurales.

En cuanto a la eficiencia en el uso de los recursos, el alimento balanceado resultó ser el factor más determinante, tanto por su peso económico (alrededor del 61% de los costos de producción) como por su relación directa con la contaminación del estanque, ya que el alimento no consumido termina como materia orgánica sedimentada. El agua, aunque garantiza condiciones estables para el cultivo gracias a su flujo continuo, se maneja sin medición ni control de caudal, lo que impide saber cuánto recurso se está utilizando realmente y limita cualquier esfuerzo de optimización. A esto se suma una mortalidad cercana al 20%, que representa tanto una pérdida biológica como una oportunidad de mejora si se fortalecen las prácticas de adaptación y manejo sanitario de los alevines.

Respecto a los lodos generados durante la limpieza del estanque, el estudio confirmó que se retiran y se depositan cerca de la finca sin ningún tratamiento, cuando en realidad podrían convertirse en un subproducto de valor si se destinan a la elaboración de compost o como acondicionador de suelos. Esta es, junto con el ajuste en la alimentación y el control del agua, una de las tres líneas de acción concretas que se plantean en la matriz de oportunidades de Producción Más Limpia, y probablemente la que representa el cambio más sencillo de implementar en el corto plazo.

El análisis económico respalda la viabilidad de aplicar estas mejoras. Con una inversión inicial relativamente baja y un periodo de recuperación estimado en apenas 1,5 meses, el negocio ya es rentable en las condiciones actuales, por lo que cualquier ajuste que reduzca el desperdicio de alimento, optimice el uso del agua o valorice los lodos tendría un efecto directo sobre la utilidad del productor, no solo sobre el desempeño ambiental. Esto es justamente lo que hace atractiva la Producción Más Limpia para este tipo de finca familiar: no exige inversiones grandes, sino cambios en la forma de gestionar lo que ya se tiene.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al señor Manuel Yautibug, propietario de la finca “Los Tres Chanchitos y Yo”, por su colaboración durante el desarrollo de la investigación, y a la Universidad Estatal Amazónica (UEA) por el apoyo institucional brindado.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tiene conflicto de interés.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Garlock T, Asche F, Anderson J, Ceballos-Concha A, Love DC, Osmundsen TC, Pincinato RBM. Aquaculture: The missing contributor in the food security agenda. Glob Food Sec. 2022;32:100620. doi: 10.1016/j.gfs.2022.100620.

2. Troell M, Costa-Pierce B, Stead S, Cottrell RS, Brugere C, Farmery AK, Little DC, Strand Å, Pullin R, Soto D, et al. Perspectives on aquaculture's contribution to the Sustainable Development Goals for improved human and planetary health. J World Aquac Soc. 2023;54:251–342. doi: 10.1111/jwas.12946.

3. Gul S, Shafiq U, Mir SA, Iqbal G, Lone HQ. Enhancing Global Food Security through Sustainable Fisheries and Aquaculture: A Comprehensive Review. Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology. 2024;42:60–70. doi: 10.9734/ajaees/2024/v42i102563.

4. Veintimilla-Morán GE. Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de Tilapias Rojas (Oreochromis sp) en el cantón Quevedo: Feasibility study for the production and commercialization of Red Tilapia (Oreochromis sp) in the canton of Quevedo. Multidisciplinary Latin American Journal [Internet]. 2023 [cited 2026 Jul 25];1. doi: 10.5281/ZENODO.11022096.

5. Sultana N, Rahman MM, Khanam R, Islam KMZ, Islam Rayhan MR. Investigating the prospect of cleaner production in informal enterprises: A scientific assessment of environmental burdens and economic efficiency. Heliyon. 2023;9:e14583. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14583.

6. de Oliveira Neto GC, Leite RR, Lucato WC, Vanalle RM, Amorim M, Matias JCO, Kumar V. Overcoming Barriers to the Implementation of Cleaner Production in Small Enterprises in the Mechanics Industry: Exploring Economic Gains and Contributions for Sustainable Development Goals. Sustainability 2022, Vol 14, Page 2944 [Internet]. 2022 [cited 2026 Jul 25];14:2944. doi: 10.3390/SU14052944.

7. Kumar L, Naqvi SA, Deitch MJ, Khalid MJ, Naeem K, Qayyum Amjad A, Kumar A, Gebremicael TG, Arshad M. Opportunities and constraints for cleaner production policy in the developing world: a case study of Sindh Region, Pakistan. Environ Dev Sustain. 2023;26:4391–4434. doi: 10.1007/s10668-022-02889-0.

8. Caiza López DL, Shiguango Grefa JF, Ordoñez Bravo EF, Quishpe Mejia MA. Impacto de la agroindustria en el desarrollo económico y sostenibilidad ambiental en Ecuador. RECIENA. 2025;5:33–42. doi: 10.47187/ty6mtj68.

9. Caiza López DL, Ordoñez Bravo EF, Caiza López JC, Illescas Calle AP. Producción agroindustrial y comercialización de pitahaya: estudio de caso en la finca Don Rafa, Palora. RECIENA. 2025;5:18–28. doi: 10.47187/wek9ke44.

10. Campanati C, Willer D, Schubert J, Aldridge DC. Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture. 2022;30:143–169. doi: 10.1080/23308249.2021.1897520.

11. Masi M, Adinolfi F, Vecchio Y, Agnusdei GP, Coluccia B. Toward the Circular Economy in the Aquaculture Sector: Bibliometric, Network and Content Analyses. Sustainability. 2024;16:5405. doi: 10.3390/su16135405.

12. Brugère C, Aguilar-Manjarrez J, Beveridge MCM, Soto D. The ecosystem approach to aquaculture 10 years on – a critical review and consideration of its future role in blue growth. Rev Aquac. 2019;11:493–514. doi: 10.1111/raq.12242.

13. Nuñez Moreno MS. Implementación de la estrategia ambiental Producción más Limpia (PmL) para el proceso productivo de la microempresa Productos Lácteos del Norte. AlfaPublicaciones. 2021;3:28–49. doi: 10.33262/ap.v3i2.2.57.

14. Quiloango-Chimarro CA, Gioia HR, de Oliveira Costa J. Typology of Production Units for Improving Banana Agronomic Management in Ecuador. AgriEngineering. 2024;6:2811–2823. doi: 10.3390/agriengineering6030163.

15. Mercado Mamani SL, Collazos Cabrera JA. Contexto del impacto ambiental generado por la agroindustria en el Perú. Innova Biology Sciences. 2022;2:13–22. doi: 10.58720/ibs.v2i3.50.

16. Organización de Las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial [ONUDI]. Manual de Producción Más Limpia. 2008 [cited 2026 Jul 25];

17. Bernal Figueroa AA, Beltrán Parada CJ, Márquez Márquez AF. Producción Más Limpia: una revisión de aspectos generales. I3+. 2017;3:66–85. doi: 10.24267/23462329.219.

18. Figueroa Robalino JS, Chóez Pin JO. Producción más limpia como mecanismo de gestión ambiental para prevenir, mitigar o eliminar el impacto ambiental generado por la descarga final del agua residual industrial durante el funcionamiento del Camal Municipal del cantón Latacunga [Internet]. 2022 [cited 2026 Jul 25]. Available from: https://agris.fao.org/search/en/providers/124892/records/67124ad07f591113e2a580e4.

19. Rodríguez T, Sánchez I, Pinto O. Descripción del proceso productivo del sector curtiembre, enfocado en la aplicación de producción más limpia. GICOS: Revista del Grupo de Investigaciones en Comunidad y Salud, ISSN-e 2610-797X, Vol 6, No 2, 2021 (Ejemplar dedicado a: Especial 1 CTIE VIII Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento), págs 196-206 [Internet]. 2021 [cited 2026 Jul 25];6:196–206.

20. Boyd CE, McNevin AA. Resource Use and Pollution Potential in Feed-Based Aquaculture. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture. 2024;32:306–333. doi: 10.1080/23308249.2023.2258226.

21. Chiquito-Contreras RG, Hernandez-Adame L, Alvarado-Castillo G, Martínez-Hernández M de J, Sánchez-Viveros G, Chiquito-Contreras CJ, Hernandez-Montiel LG. Aquaculture—Production System and Waste Management for Agriculture Fertilization—A Review. Sustainability. 2022;14:7257. doi: 10.3390/su14127257.

22. Ibrahim LA, Abu-Hashim M, Shaghaleh H, Elsadek E, Hamad AAA, Alhaj Hamoud Y. A Comprehensive Review of the Multiple Uses of Water in Aquaculture-Integrated Agriculture Based on International and National Experiences. Water (Basel). 2023;15:367. doi: 10.3390/w15020367.

23. Liu Z, Li J, Luo L, Yu Y, Yan J, Sun C, Miao X, Li W. Regime Shifts in Microbial and Water Quality Dynamics in Red Tilapia Ponds. Microorganisms. 2025;13:1553. doi: 10.3390/microorganisms13071553.

24. Kurniawan SB, Ahmad A, Imron MF, Abdullah SRS, Othman AR, Hasan HA. Achieving a Biocircular Economy in the Aquaculture Sector Through Waste Valorization. Toxics. 2025;13:131. doi: 10.3390/toxics13020131.

25. Hleibieh M, Hanc A, Michal P, Hrebeckova T. Composting and Vermicomposting of Fish Sludge with Egg Boxes and Lettuce Wastes with the Addition of Eggshells: Impacts on Chemical Properties, Nutrient Availability, and Safety. Agronomy. 2026;16:473. doi: 10.3390/agronomy16040473.

26. Nenciu F, Voicea I, Cocarta DM, Vladut VN, Matache MG, Arsenoaia V-N. "Zero-Waste" Food Production System Supporting the Synergic Interaction between Aquaculture and Horticulture. Sustainability. 2022;14:13396. doi: 10.3390/su142013396.

27. Burad-Méndez A, Domínguez-May R, Olvera-Novoa MA, Robledo D, Salas S. Economic analysis of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) production based on farm size and number of rearing tanks. Lat Am J Aquat Res. 2023;51:747–759. doi: 10.3856/vol51-issue5-fulltext-3071.

28. Dorantes-De-La-O JCR, Maeda-Martínez AN. Bioeconomic model for the evaluation of a backyard aquaculture system for tilapia (Oreochromis niloticus). Lat Am J Aquat Res. 2023;51:282–294. doi: 10.3856/vol51-issue2-fulltext-2999.

29. Bezerra GA, Pires DC, Watanabe AL, Buglione Neto CC, Cardoso AJ da S, Simões ARP, Hisano H. Economic Feasibility and Risk Analysis of Nile Tilapia Juveniles Reared in a Biofloc Technology System. Aquaculture Journal. 2025;5:9. doi: 10.3390/aquacj5020009.

30. Haenen OLM, Dong HT, Hoai TD, Crumlish M, Karunasagar I, Barkham T, Chen SL, Zadoks R, Kiermeier A, Wang B, et al. Bacterial diseases of tilapia, their zoonotic potential and risk of antimicrobial resistance. Rev Aquac. 2023;15:154–185. doi: 10.1111/raq.12743.

31. Delphino M, Joshi R, Alvarez AT. Economic appraisal of using genetics to control Streptococcus agalactiae in Nile tilapia under cage and pond farming system in Malaysia. Sci Rep. 2022;12:8754. doi: 10.1038/s41598-022-12649-9.

32. Firouzi S, Kosari-Moghaddam A, Radgoudarzi M. Resource use efficiency of warm-water fish culture upon different pond sizes. Environ Prog Sustain Energy. 2022;41. doi: 10.1002/ep.13778.

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria
ISSN 2773 - 7608
https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/index
Facultad de Ciencias Pecuarias

ARTÍCULO ORIGINAL *Recibido:* 20/08/2026 · *Aceptado:* 18/09/2026 · *Publicado:* 07/10/2026
DOI: https://doi.org/10.47187/mry2wb10

VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DEL CACAO MEDIANTE TECNOLOGÍAS EMERGENTES: EVIDENCIA, LIMITACIONES Y PRIORIDADES DE INVESTIGACIÓN

VALORIZATION OF COCOA BY PRODUCTS USING EMERGING TECHNOLOGIES: EVIDENCE, LIMITATIONS AND RESEARCH PRIORITIES

[1] Cristina Gisela Arias Arias * | cristina.arias@espoch.edu.ec

[1] Riobamba Ecuador Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Carrera de Agroindustria.

E-mail: * cristina.arias@espoch.edu.ec

RESUMEN

La cáscara de la mazorca, el mucílago y la cascarilla del grano de cacao tienen composiciones y trayectorias de procesamiento diferentes. Esta revisión crítica examina la evidencia sobre su valorización alimentaria mediante campos eléctricos pulsados, presión hidrostática y tecnologías de extracción complementarias. Se realizó una búsqueda documental dirigida hasta septiembre de 2026 en sitios de editoriales, PubMed, repositorios institucionales y organismos estadísticos; se incluyeron trabajos con identificación verificable de la matriz, tratamiento y resultado. La evidencia directa respalda la aplicación de campos eléctricos pulsados a cascarilla y cáscara de mazorca; un ensayo reciente utilizó 6 kV/cm y 1000–5000 pulsos. Para pectina de cáscara, la extracción enzimática obtuvo 10,20 g/100 g de materia prima frente a 8,08 g/100 g con el método químico en el mismo estudio, mientras que el agua subcrítica alcanzó 6,58 % en otro diseño. Estas cifras no permiten una comparación entre estudios por diferencias de materia prima y protocolo. La presión hidrostática cuenta con antecedentes en otras matrices, pero la evidencia directa sobre subproductos del cacao sigue limitada. La inocuidad, el balance de materia, la energía y los costos rara vez se estudian conjuntamente. Se propone comparar cada tecnología con un control convencional sobre lotes caracterizados, con medidas de rendimiento, calidad e impacto. La posibilidad de valorización es real, pero su superioridad industrial y su seguridad alimentaria requieren validación específica.

Palabras clave: *Theobroma cacao; cascarilla; cáscara de mazorca; campos eléctricos pulsados; presión hidrostática; economía circular.*

ABSTRACT

Cocoa pod husk, pulp mucilage and cocoa bean shell differ in composition and processing history. This critical review examines evidence for their food valorization through pulsed electric fields, high pressure processing and complementary extraction technologies. A targeted literature search through September 2026 covered publisher websites, PubMed, institutional repositories and official statistical sources; records were retained when the matrix, treatment and outcome were identifiable. Direct evidence supports pulsed electric field treatment of bean shell and pod husk; a recent study used 6 kV/cm and 1,000–5,000 pulses. For pod husk pectin, enzymatic extraction yielded 10.20 g/100 g feedstock versus 8.08 g/100 g with a chemical method within one study, while subcritical water yielded 6.58% under another design. Differences in material and protocol preclude comparison across studies. High pressure has supporting evidence from other plant matrices, but direct evidence for cocoa by products remains limited. Safety, material balances, energy and costs are seldom examined together. We propose matrix-specific comparisons against a conventional control using characterized batches and simultaneous measures of recovery, quality and impact. Valorization is plausible, but industrial superiority and food safety require application-specific validation.

Keywords: *Theobroma cacao; cocoa bean shell; cocoa pod husk; pulsed electric fields; high pressure processing; circular economy.*

Reciena Vol. 6 Núm. 2 (2026): 66 - 70

1. INTRODUCCIÓN

La valorización de subproductos agroindustriales suele presentarse como una solución directa a la pérdida de recursos. En realidad, el aprovechamiento depende de que el material pueda recuperarse con calidad constante, estabilizarse a tiempo y transformarse en un ingrediente seguro cuyo valor compense transporte y procesamiento. El informe de la FAO sobre pérdidas y desperdicio alimentario aporta el marco general, aunque sus porcentajes globales no equivalen a una estimación de subproductos del cacao [1].

La escala productiva ecuatoriana justifica estudiar opciones específicas: la ESPAC 2022 registró 591 557 ha plantadas de cacao, 509 179 ha cosechadas y 337 149 t de producción [2]. Dividir la producción reportada por la superficie cosechada da 0,662 t/ha, un indicador descriptivo agregado. Ninguna de estas cifras mide la masa de cáscara, mucílago o cascarilla disponible; multiplicarlas por una fracción supuesta de residuos produciría un inventario ficticio. También varían la variedad, la humedad, la fermentación y las condiciones poscosecha.

La cáscara de mazorca se genera en la finca y plantea retos de humedad y transporte; el mucílago participa en la fermentación; la cascarilla se separa del grano durante la elaboración de chocolate. El término «cáscara» se usa de forma ambigua en la literatura, de modo que identificar la anatomía y el punto de generación constituye una condición previa para comparar estudios. Investigaciones recientes documentan extracción de pectina de mazorca y compuestos fenólicos de cascarilla mediante tratamientos físicos o enzimáticos [3–8].

El manuscrito original destacaba la presión hidrostática elevada y los campos eléctricos pulsados, pero extrapolaba resultados de uva y oliva al cacao. Esta revisión amplía el alcance a comparadores pertinentes para responder tres preguntas: ¿qué evidencia directa existe por matriz y tecnología?, ¿qué se puede comparar cuantitativamente sin confundir protocolos?, y ¿qué condiciones de seguridad y escala deben resolverse antes de proponer un producto alimentario?

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A. ***Diseño, búsqueda y selección***

Se elaboró una revisión narrativa crítica con extracción estructurada de información; no se presenta como revisión sistemática ni metaanálisis. El manuscrito suministrado se utilizó para identificar términos y referencias iniciales. El 25 de septiembre de 2026 se realizaron búsquedas dirigidas en PubMed, páginas de revistas y editoriales, repositorios universitarios y portales de FAO e INEC. Se utilizaron combinaciones en español e inglés de «cocoa bean shell», «cocoa pod husk», «cocoa mucilage», «pulsed electric field», «high pressure», «pectin», «extraction», «cadmium», «ochratoxin» y «Ecuador ESPAC 2022». La búsqueda fue selectiva y no permite estimar la exhaustividad del campo.

Se incluyeron investigaciones originales con identificación verificable de subproducto, tecnología, condiciones o desenlaces, además de publicaciones oficiales para contexto estadístico. Los estudios en matrices distintas del cacao se conservaron solo como antecedentes de mecanismo y se marcaron como evidencia indirecta. Se excluyeron referencias incompletas, tesis no verificables, afirmaciones comerciales y resultados cuyo denominador o unidad no podían identificarse. La selección se concentró en estudios de extracción, composición o inocuidad, sin restringir por resultado favorable.

B. ***Extracción, comparación y límites***

Para cada fuente se registraron matriz, escala o procedimiento informado, variables de proceso, desenlace medido, denominador del rendimiento y principal limitación. Se conservaron las unidades publicadas. Los valores de rendimiento se comparan únicamente dentro de un mismo experimento cuando existe control; entre publicaciones se exponen como ejemplos de factibilidad, sin calcular un efecto combinado. El cambio relativo de 10,20 frente a 8,08 g/100 g se calculó como (10,20 − 8,08)/8,08 × 100 = 26,2 %; no es una medida de superioridad general. No se infieren tasas de contaminación ni beneficios clínicos a partir de ensayos químicos in vitro. La ausencia de un protocolo de búsqueda exhaustiva, de doble cribado y de evaluación formal de sesgo limita la fuerza de las inferencias.

3. RESULTADOS

A. ***Magnitud del cultivo y definición de las corrientes***

Indicador ESPAC 2022	**Valor**	**Interpretación**
Superficie plantada de cacao	591 557 ha	Área total plantada; no equivale a área cosechada.
Superficie cosechada de cacao	509 179 ha	Denominador de la productividad agregada.

Indicador ESPAC 2022	Valor	Interpretación
Producción de cacao	337 149 t	Producción reportada; no cuantifica subproductos.
Producción / área cosechada	0,662 t/ha	Cálculo descriptivo propio: 337 149 / 509 179.

Tabla 1. *Cifras de la ESPAC 2022 [2]. La última fila es un cálculo propio; ninguna fila estima residuos disponibles.*

Para construir un inventario industrial habría que pesar cada corriente en base húmeda y seca en puntos concretos de la cadena, registrar humedad inicial y pérdidas de manejo, y estimar la fracción técnicamente recuperable. La cascarilla generada en planta puede concentrarse espacialmente; la cáscara de mazorca queda dispersa entre fincas; el mucílago no debe retirarse sin medir el efecto sobre fermentación y calidad sensorial.

B. ***Comparación de los estudios experimentales***

Estudio y matriz	Tratamiento y condición	Resultado publicado	Alcance de la inferencia
Barbosa-Pereira et al. [3], cascarilla	Pretratamiento con campos eléctricos pulsados y extracción posterior	Mejora de recuperación de polifenoles reportada por los autores.	Evidencia directa de viabilidad; requiere revisar energía y control por lote.
Janma et al. [4], cáscara de mazorca	6 kV/cm; 1000–5000 pulsos; agua y mezclas hidroalcohólicas	Mejor desempeño fenólico con 50–75 % etanol y 1000–3000 pulsos, según el resumen.	Respuesta asociada tanto a solvente como a pulsos; no prueba rendimiento industrial.
Hennessey-Ramos et al. [5], cáscara de mazorca	Celulasa 40 µL/g; 18,54 h; 6 % de sustrato	Pectina: 10,20 g/100 g; control químico: 8,08 g/100 g.	Comparación interna: +26,2 % de rendimiento gravimétrico; pureza no idéntica.
Anoraga et al. [6], cáscara de mazorca	Agua subcrítica a 120 °C, 10 min; sólido:líquido 1:15	Pectina: 6,58 %; valor predicho 7,29 %.	Diseño distinto: no comparar su porcentaje con [5] como eficacia relativa.
Younes et al. [7], cascarilla	Extracción alcalina de polisacáridos de pared	Fracción aislada: 80,6–86 % polisacáridos pécticos.	Composición de fracción aislada, no rendimiento de pectina por masa inicial.

Tabla 2. *Evidencia experimental por corriente. Los valores corresponden a desenlaces y denominadores distintos; no constituyen un metaanálisis.*

Dos resultados merecen una lectura cuidadosa. En el estudio enzimático [5], la diferencia de rendimiento gravimétrico no implica automáticamente mayor calidad: el contenido de ácido galacturónico informado fue 52,06 g/100 g de pectina para la extracción enzimática y 60,97 g/100 g para la química. En el trabajo de agua subcrítica [6], 6,58 % fue un resultado obtenido a condiciones optimizadas, no una tasa nacional de recuperación. Estos ejemplos muestran por qué rendimiento, composición y funcionalidad deben presentarse juntos.

C. ***Principios de operación y evidencia indirecta***

Los campos eléctricos pulsados someten el tejido a un campo que puede inducir electroporación. Su efecto sobre la difusión depende de intensidad, duración y número de pulsos, geometría, conductividad, temperatura, tamaño de partícula y solvente. Los estudios directos de cascarilla [3] y mazorca [4] respaldan su exploración, pero no permiten afirmar que la energía total o el costo por kilogramo recuperado sean menores que los de cualquier método térmico.

La presión hidrostática se aplica a sistemas cerrados y puede modificar la estructura celular y el transporte de compuestos. Corrales et al. compararon extracción asistida por ultrasonido, presión y pulsos en subproductos de uva [9]; es un antecedente metodológico, no una medición sobre cacao. La presión usada para conservación microbiológica tampoco debe equipararse a una extracción alimentaria: cambian objetivo, matriz, medio y variables de respuesta [10]. En las fuentes directas identificadas para cacao, la evidencia de presión hidrostática es insuficiente para ordenar esta tecnología frente a pulsos eléctricos.

La extracción enzimática y el agua subcrítica constituyen comparadores técnicos relevantes porque se han estudiado directamente para pectina de mazorca [5,6]. El agua subcrítica evita solventes orgánicos en la etapa de extracción, pero demanda calor y presión; un balance ambiental requiere cuantificar ambas entradas. La revisión de una línea de proceso debe incluir preparación del material, extracción, concentración, secado y tratamiento de

efluentes, no solo la etapa de mayor rendimiento de laboratorio.

D. ***Inocuidad y aplicación alimentaria***

La cascarilla puede concentrar sustancias indeseables procedentes del cultivo o del secado y almacenamiento. Un estudio sobre ocratoxina A encontró mayor concentración en la cubierta del grano que en el nib tras el descascarillado [11]. La investigación isotópica sobre plomo también señaló la posibilidad de contaminación de la cubierta durante operaciones poscosecha [12]. Estos hallazgos justifican medir contaminantes en el lote y en el extracto final; no demuestran que toda cascarilla sea insegura.

La teobromina y la cafeína se deben cuantificar según la dosis prevista y la población destinataria. La detección de capacidad antioxidante mediante ensayos DPPH o FRAP, o de inhibición enzimática in vitro, tampoco autoriza promesas de prevención de cáncer, diabetes o enfermedades cardiovasculares. Antes de comercializar una infusión u otro ingrediente se necesitan caracterización microbiológica, contaminantes, estabilidad, evaluación sensorial, exposición dietaria y revisión de la normativa aplicable al destino previsto.

4. DISCUSIÓN

A. ***Qué resuelve la evidencia y qué permanece abierto***

La evidencia ha avanzado desde el planteamiento genérico de «residuo valioso» hacia ensayos sobre corrientes definidas. Para pulsos eléctricos existen estudios directos en cascarilla y mazorca [3,4]; para pectina de mazorca, los métodos enzimático y de agua subcrítica ofrecen controles y variables concretas [5,6]. El principal vacío para presión hidrostática aplicada al cacao sigue siendo la escasez de comparaciones directas bajo condiciones equivalentes. Una comparación entre tecnologías debe igualar lote, base de masa seca, solvente, tiempo total y análisis de producto, y reportar incertidumbre experimental.

El escenario ecuatoriano exige además evaluar la localización de la planta. La cáscara de mazorca húmeda puede requerir estabilización cercana a la finca, mientras que la cascarilla suele estar disponible en instalaciones de tostado. El costo logístico por kilogramo de producto recuperado, junto con la demanda energética del secado, puede cambiar el orden de preferencia tecnológica. Las cifras de ESPAC [2] muestran la importancia del cultivo, pero no resuelven esa decisión empresarial.

B. ***Agenda experimental propuesta***

Etapa	Variable de control y medición	Criterio de decisión
Muestreo	≥3 lotes independientes; variedad, origen, humedad, fecha y etapa de proceso.	Cuantificar variabilidad real de materia prima.
Control	Extracción convencional con mismo lote, solvente y base seca.	Atribuir el cambio al tratamiento comparado.
Diseño	Diseño factorial o superficie de respuesta; intensidad/dosis y tiempo; réplicas independientes.	Estimar interacciones e intervalos de confianza.
Producto	Masa extraída, pureza, perfil de compuestos, actividad funcional y estabilidad.	Evitar maximizar solo fenoles totales.
Seguridad	Cadmio, plomo, ocratoxina A, microbiología, metilxantinas y exposición.	Comprobar aptitud para uso previsto.
Escala	kWh/kg de materia seca, agua y solvente/kg de producto, costos y efluentes.	Evaluar factibilidad técnica y ambiental.

Tabla 3. *Protocolo de validación propuesto por esta revisión; los umbrales y el número definitivo de réplicas deben fijarse mediante potencia estadística y normativa del producto.*

Un estudio de alto impacto podría formular como hipótesis que un pretratamiento por pulsos aumenta el rendimiento de un compuesto objetivo por unidad de energía y solvente respecto al control, sin disminuir la calidad ni aumentar la exposición a contaminantes. Esa hipótesis obliga a escoger una corriente, un producto y un desenlace primario antes de recolectar datos. Un análisis de sensibilidad de costos y un análisis de ciclo de vida con límites de sistema explícitos completarían la evaluación, pero no sustituyen los experimentos.

C. ***Limitaciones de la revisión***

La búsqueda fue dirigida y no tuvo registro prospectivo, conteo exhaustivo de registros ni evaluación pareada de sesgo. Se incluyeron resúmenes cuando el texto completo no estaba disponible; por ello, algunos detalles operativos permanecen sin verificar. Las unidades y matrices heterogéneas impidieron la síntesis estadística conjunta. El trabajo aporta una síntesis crítica y una ruta de validación, no resultados experimentales nuevos ni una demostración de superioridad de tecnologías.

5. DISCUSIONES

La valorización de cacao debe organizarse por corriente material. Los campos eléctricos pulsados tienen evidencia experimental directa en cascarilla y cáscara de mazorca; la extracción enzimática y el agua subcrítica muestran rutas comparables para pectina de mazorca dentro de sus respectivos estudios. La presión hidrostática conserva interés tecnológico, pero no puede recomendarse como opción superior para cacao a partir de resultados de otras matrices.

Para transformar estos resultados en ingredientes alimentarios o procesos industriales se necesitan ensayos con controles equivalentes, balances completos de masa y energía y verificación de inocuidad. La prioridad investigativa es comparar rendimiento y calidad por unidad de recurso sobre lotes independientes, acompañados de evaluación económica y ambiental. Esa evidencia permitiría decidir qué subproducto y qué proceso generan valor en un contexto productivo definido.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction. Rome: FAO; 2019. https://www.fao.org/interactive/state-of-food-agriculture/2019/en/

2. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, ESPAC 2022. Quito: INEC; 2023. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-2022/

3. Barbosa-Pereira L, Guglielmetti A, Zeppa G. Pulsed electric field assisted extraction of bioactive compounds from cocoa bean shell and coffee silverskin. Food Bioprocess Technol. 2018;11:818–835. doi:10.1007/s11947-017-2045-6.

4. Janma S, Sassa-deepaeng T, Tharawatchruk W, Pranamormkrit P, Saijai S, Pheerathamrongrat W, et al. Pulsed electric field–assisted green extraction of cocoa pod husk: enhancement of antioxidant and tyrosinase inhibitory activities. J Sci Agric Technol. 2025;6(2):29–39. doi:10.14456/jsat.2025.8.

5. Hennessey-Ramos L, Murillo-Arango W, Vasco-Correa J, Paz Astudillo IC. Enzymatic extraction and characterization of pectin from cocoa pod husks (Theobroma cacao L.) using Celluclast 1.5 L. Molecules. 2021;26(5):1473. doi:10.3390/molecules26051473.

6. Anoraga SB, Shamsudin R, Hamzah MH, Sharif S, Saputro AD, Mohd Basri MS. Optimization of subcritical water extraction for pectin extraction from cocoa pod husks using the response surface methodology. Food Chem. 2024;459:140355. doi:10.1016/j.foodchem.2024.140355.

7. Younes A, Karboune S, Liu L, Andreani ES, Dahman S. Extraction and characterization of cocoa bean shell cell wall polysaccharides. Polymers. 2023;15(3):745. doi:10.3390/polym15030745.

8. Muñoz-Almagro N, Valadez-Carmona L, Mendiola JA, Ibáñez E, Villamiel M. Structural characterisation of pectin obtained from cacao pod husk: comparison of conventional and subcritical water extraction. Carbohydr Polym. 2019. doi:10.1016/j.carbpol.2019.04.040.

9. Corrales M, Toepfl S, Butz P, Knorr D, Tauscher B. Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: a comparison. Innov Food Sci Emerg Technol. 2008;9(1):85–91.

10. Mújica-Paz H, Valdez-Fragoso A, Tonello C, Welti-Chanes J, Torres JA. High-pressure processing technologies for the pasteurization and sterilization of foods. Food Bioprocess Technol. 2011;4:969–985.

11. Amézqueta S, González-Peñas E, Murillo M, López de Cerain A. Occurrence of ochratoxin A in cocoa beans: effect of shelling. Food Addit Contam. 2005;22(6):590–596. doi:10.1080/02652030500130160.

12. Rankin CW, et al. Lead contamination in cocoa and cocoa products: isotopic evidence of global contamination. Environ Health Perspect. 2005;113:1344–1348. doi:10.1289/ehp.8009.

RECIENA
Revista Científica Agropecuaria

Líneas de investigación:

Ciencias agrícolas y agroindustriales
Ciencias zootécnicas y biológicas
Ciencia e ingeniería de Alimentos
Ciencia e ingeniería de biomateriales
Medicina animal
Procesos agropecuarios y agroindustriales
Economía, gerencia y negocios agropecuarios
Aplicaciones de otras ciencias a estas áreas.

Información: reciena.fcp@espoch.edu.ec

espoch | Facultad de Ciencias Pecuarias

espoch.edu.ec