

v.3, n.4, 2026 - Abril

REVISTA O UNIVERSO OBSERVÁVEL

CRISIS DEL CADMIO EN CACAO (THEOBROMA CACAO): Un desafío para la sostenibilidad agrícola en Ecuador

Cadmium crisis in Cacao (*Theobroma cacao*): A challenge for agricultural
sustainability in Ecuador

Vergara Candela, Cristhian Alejandro¹
Zambrano Pillaga, Nestor Imer²
Alonzo Mero, Joel Jesus³

Revista O Universo Observável

DOI: 10.69720/29660599.2026.000293

[ISSN: 2966-0599](https://doi.org/10.69720/29660599.2026.000293)

¹Instituto Superior Pedagógico Intercultural Bilingüe Quilloac, Cañar, Ecuador

E-mail: cvergara@institutoquilloac.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8006-6234>

²Instituto Superior Pedagógico Intercultural Bilingüe Quilloac, Cañar, Ecuador

E-mail: nzambrano@institutoquilloac.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1212-5989>

³Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador

E-mail: alonzo-joel8729@unesum.edu.ec

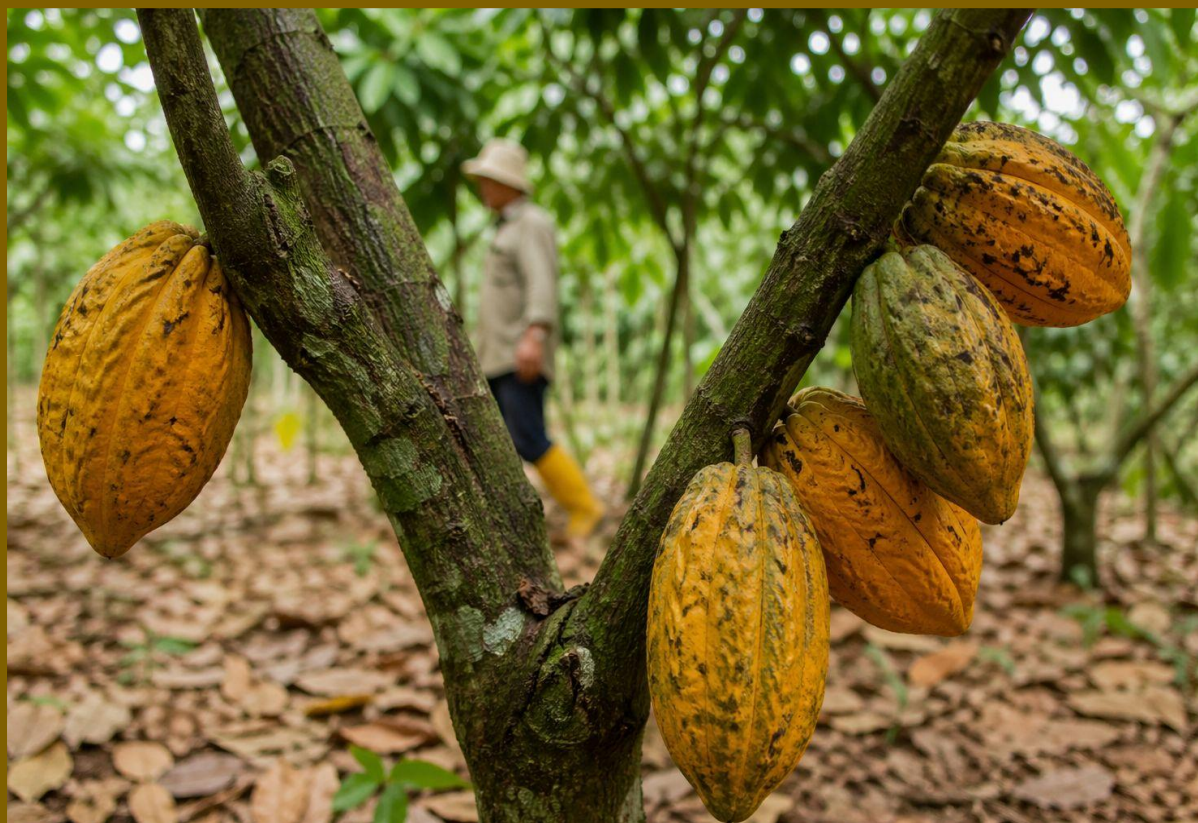
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5413-3016>



v.3, n.4, 2026 - Abril

CRISIS DEL CADMIO EN CACAO (THEOBROMA CACAO): Un desafío para la sostenibilidad agrícola en Ecuador

Vergara Candela Cristhian Alejandro,
Zambrano Pillaga Nestor Imer e Alonzo Mero Joel Jesus



PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
2966-0599

www.ouniversoobservavel.com.br

Editora e Revista
O Universo Observável
CNPJ: 57.199.688/0001-06
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

RESUMEN

En los últimos años, la crisis del cadmio (Cd) representa una amenaza significativa para los agricultores de Ecuador, especialmente para aquellos implicados en la producción de cacao (*Theobroma cacao*), los niveles elevados de este metal pesado tóxico ponen en peligro tanto la salud pública como la sostenibilidad agrícola. Se realizó un recorrido por las bases teóricas del área, el impacto de contaminación del Cd que proviene tanto de fuentes naturales, como la actividad volcánica, de factores inducidos por el ser humano, incluidos procesos industriales y el uso de fertilizantes contaminados, lo que provoca acumulaciones en suelos y cultivos agrícolas. Esta situación es impactante dado el estatus de Ecuador como gran productor de cacao, donde los medios de vida de más de 150.000 familias dependen de este cultivo. Originalmente, se efectuó una revisión documental bajo la metodología PRISMA de investigaciones que integran diversos aportes y artículos científicos en un proceso semántico de información. Los resultados por contaminación de Cd van más allá de preocupaciones medioambientales, considerando riesgos para la salud, debido a la bioacumulación en productos alimentarios, especialmente en granos de cacao. Los mercados internacionales, especialmente la Unión Europea, endurecen las regulaciones sobre los niveles permitidos de cadmio en los alimentos, los agricultores de pequeñas explotaciones se enfrentan a presiones crecientes para cumplir con las normas de seguridad o arriesgarse a perder el acceso a mercados. Esta dinámica agrava las vulnerabilidades económicas, ya que muchos agricultores carecen de los recursos y conocimientos necesarios para adaptarse a estas condiciones cambiantes.

Palabras clave: Incidencia de cadmio; *Theobroma cacao*; amenazas; agricultura.

ABSTRACT

*In recent years, the cadmium (Cd) crisis poses a significant threat to farmers in Ecuador, especially those involved in cocoa (*Theobroma cacao*) production, elevated levels of this toxic heavy metal endanger both public health and agricultural sustainability. A tour was made of the theoretical bases of the area, the impact of pollution of Cd that comes from both natural sources, such as volcanic activity, from human-induced factors, including industrial processes and the use of contaminated fertilizers, which causes accumulations in soils and agricultural crops. This situation is shocking given Ecuador's status as a major cocoa producer, where the livelihoods of more than 150,000 families depend on the crop. Originally, a documentary review was carried out under the PRISMA methodology of research that integrates various contributions and scientific articles in a semantic process of information. The results for Cd contamination go beyond environmental concerns, considering health risks, due to bioaccumulation in food products, especially in cocoa beans. International markets, especially the European Union, tighten regulations on allowable levels of cadmium in food, and farmers on small farms face increasing pressure to comply with safety standards or risk losing access to markets. This dynamic exacerbates economic vulnerabilities, as many farmers lack the resources and knowledge to adapt to these changing conditions.*

Key words: Cadmium incidence; *Theobroma cacao*; threats; agriculture.

INTRODUCCIÓN

El cacao, siendo el cultivo más importante en el Ecuador, se encuentra en alto riesgo, con varios estudios documentando una alta y creciente bioacumulación de Cd en los granos de cacao, especialmente en zonas con una fuerte industrialización. Para los agricultores, esto representa una pérdida de sus medios de vida, ya que, por el aumento de los estándares de seguridad, se limitan el acceso al mercado y la rentabilidad económica de sus productos (Meter, et al., 2019).

El cacao se ha consolidado en 2026 como el segundo producto no petrolero de exportación más importante de Ecuador, impulsado por una demanda global creciente que proyecta un mercado de chocolate premium con un crecimiento anual del 12.2%. Sin embargo, la sostenibilidad de este liderazgo se ve amenazada por la presencia de Cd, un metal pesado cuya bioacumulación en las

almendras genera riesgos toxicológicos graves (Senplades, 2022).

Desde el punto de vista de la biología, se ha observado que las plantas de *Theobroma cacao* poseen una notable capacidad de fitoacumulación, siendo capaz de absorber el Cd presente en el suelo por medio de transportadores catiónicos que se encuentran en sus raíces. Una vez que ha ocurrido la absorción, el metal se desplaza hacia las hojas y, en última instancia, hacia los granos de cacao, que son el componente comercial de interés. La variabilidad en los niveles de acumulación se debe tanto al genotipo de la planta como a las características físicoquímicas del suelo, lo que complejiza la búsqueda de una misma solución en distintas zonas del territorio del país (Chancay A., et al., 2022).

En respuesta, han surgido múltiples iniciativas para mejorar la capacidad de los

agricultores, enfocándose en prácticas agrícolas sostenibles y la adherencia a regulaciones internacionales. Estas iniciativas subrayan la importancia de la colaboración entre agricultores, agencias gubernamentales y organizaciones internacionales para navegar el complejo panorama de la crisis del Cd. La crisis de Cd en Ecuador plantea un urgente desafío ambiental y económico para los agricultores, subrayando la necesidad urgente. Estrategias integrales que combinen reforma regulatoria, iniciativas educativas y esfuerzos colaborativos para asegurar la sostenibilidad de la agricultura familiar son esenciales para abordar el problema. Esto es crítico no solo para la salud de las comunidades locales, sino también para el futuro de la vital industria del cacao en Ecuador (FAO, 2024).

Esto se relaciona directamente con la calidad del suelo, ya que el Cd puede hacer que la atmósfera se deposite y, después, afectar a las tierras agrícolas cercanas. En Ecuador, el hallazgo de este metal en la tierra, sobre todo en las zonas donde se cultiva cacao, ha causado alarma sobre la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la agricultura. Las muestras de suelo tomadas a diferentes profundidades muestran que, a pesar de que muchas poseen valores isotópicos de Cd, algunas muestran que hay un agotamiento de Cd, lo cual sugiere que se está llevando a cabo un proceso de sedimentación (Benavides, et al., 2022).

Las investigaciones recientes destacan que el origen del cadmio en los suelos ecuatorianos es tanto natural como antropogénico. Geológicamente, la actividad volcánica y la meteorización de rocas madre ricas en metales pesados contribuyen a la presencia de Cd en el perfil del suelo. Por otro lado, el uso histórico de fertilizantes fosfatados de baja calidad y ciertas prácticas de riego han incrementado los niveles de biodisponibilidad del metal, creando focos de contaminación en provincias clave como El Oro, Guayas y Manabí (Barcia I., 2024).

Los investigadores reabogan por estudios más exhaustivos sobre las concentraciones de metales pesados en los cultivos y los suelos circundantes para informar los marcos regulatorios y ayudar a los agricultores a gestionar eficazmente estas amenazas medioambientales. La combinación de estos factores ilustra la urgente necesidad de que los agricultores en Ecuador se adapten a la crisis del Cd, que supone una doble amenaza de degradación ambiental e inestabilidad económica. Una mayor comprensión y gestión de la salud del suelo, está junto con respuestas políticas adecuadas, ya que son esenciales para la sostenibilidad de la agricultura familiar en la región (FAO, 2024).

A partir de 2021, la intensificación de las regulaciones de la Unión Europea sobre límites máximos de cadmio (Reglamento 2021/1323) ha reconfigurado el interés científico hacia el estudio de la transferencia de este metal desde el suelo hasta el grano de cacao. La investigación actual busca determinar los mecanismos específicos de transporte celular, dado que niveles elevados de Cd en suelos de origen geogénico — propios de las regiones volcánicas de Ecuador — complican el cumplimiento de los estándares de 0.1 a 0.8 mg/kg en productos terminados. Esta problemática motiva la necesidad de sistematizar los hallazgos recientes sobre la movilidad del elemento para salvaguardar el acceso a los mercados europeos (Vanderschueren, et al., 2021).

Las normativas nacionales actuales en Ecuador son insuficientes para abordar los niveles de Cd y otros metales pesados en productos agrícolas, lo que pone de manifiesto una importante brecha política que pone en peligro tanto la salud pública como la viabilidad de la agricultura familiar (Benavides, et al., 2022).

La mitigación del Cd mediante enmiendas edáficas ha surgido como una de las estrategias más estudiadas en el último quinquenio para reducir la biodisponibilidad del metal. El uso de materiales como el biochar, la cal dolomítica y la zeolita busca elevar el pH del suelo para inmovilizar los iones de Cd, impidiendo su absorción radicular. Estudios realizados en la provincia de Los Ríos demuestran que la aplicación controlada de estas enmiendas puede reducir significativamente la concentración de Cd en el grano sin alterar negativamente otras propiedades químicas del suelo agrícola (Ormaza V., 2023).

La comunidad científica en Ecuador ha prestado atención a la geoquímica regional y ha comenzado a comprender que la bioacumulación de metales pesados no es homogénea en el país. Investigaciones en la Sierra y la Costa, desarrolladas durante 2025 y principios de 2026, indican que a pesar de que algunos suelos superan los 1.39 mg/kg de Cd, las semillas no siempre superan los límites críticos, lo que sugiere que el pH y la fertilización fosfatada podrían ser determinantes. Por esta razón, esta revisión responde a la necesidad de crear mapas de riesgo digitalizados que permitan a las autoridades y a los productores restringir la expansión de cultivos en áreas de elevada disponibilidad metálica (Medina R., et al., 2026).

La crisis del Cd es una problemática que genera efecto en el agroecosistema de los cultivos de cacao. Debido a que el Cd provoca una crisis en la fotosíntesis y en la absorción de los nutrientes que son cruciales para el crecimiento de estas plantas.

Cuando existe un alto Cd hay oxidación y clorosis y, esto no sólo afecta el rendimiento por hectárea de cacao, sino que también afecta la resiliencia de estos cultivos y la resistencia a plagas. Por estos motivos afecta la crisis del Cd comercialmente y por la inocuidad alimentaria (ESPOL, 2023).

Identificar los genotipos de baja acumulación es un objetivo primordial de la ciencia agrícola en Ecuador y en estos dos últimos años ha sido liderado por el INIAP. A partir de la revisión de la literatura se ha visto un interés en la utilización de patrones y en el cruce de clones de cacao comercial (CCN- 51) que sean de baja afinidad a acumular Cd. Estas estrategias son necesarias para generar respuestas que, a largo plazo, no sólo resuelvan la crisis cíclica, sino que, en términos de producción, sean sostenibles y flexibles ante la presión de los requisitos normativos internacionales en el futuro (INIAP, 2025).

El problema se extiende a la variedad genética del cultivo, ya que no todos los genotipos de cacao acumulan Cd de la misma manera. Esto abre líneas fundamentales de estudio en relación con la sostenibilidad agrícola. Se ha observado que clones populares como el CCN-51 pueden presentar diferentes dinámicas de acumulación que el cacao Nacional, lo que motiva a la comunidad científica a identificar materiales genéticos de baja absorción. La presente revisión tiene como objetivo resaltar la importancia de seleccionar patrones de injerto y variedades resistentes como un enfoque biotecnológico viable para minimizar la concentración de metales pesados mientras se mantiene la calidad organoléptica (Arcsa, 2025).

Por otra parte, la biotecnología aplicada ofrece una vía prometedora mediante el uso de microorganismos biorremediadores, como bacterias y hongos tolerantes al Cd. Estas comunidades microbianas pueden secuestrar el metal en la rizosfera a través de procesos de biosorción y precipitación extracelular, evitando que este sea transferido a los tejidos vegetales. Investigaciones recientes en Ecuador han identificado cepas nativas de *Bacillus* y *Trichoderma* que no solo mitigan la toxicidad del Cd, sino que también promueven el crecimiento de la planta, ofreciendo una solución sostenible y de bajo costo (Morejón L. y Morejón C., 2024).

Las técnicas postcosecha también representan una línea de defensa crucial para reducir los niveles de Cd en el producto final. Se ha demostrado que, durante la fermentación prolongada, la migración del Cd desde el centro de la almendra hacia la testa (cáscara) aumenta debido a la acidificación del grano. Al remover la testa durante el proceso de descascarillado en la industria,

se logra eliminar una fracción significativa del metal, permitiendo que algunos lotes que inicialmente superaban los límites logren cumplir con los estándares de exportación para derivados procesados (Bonifaz B. y Intriago F., 2023).

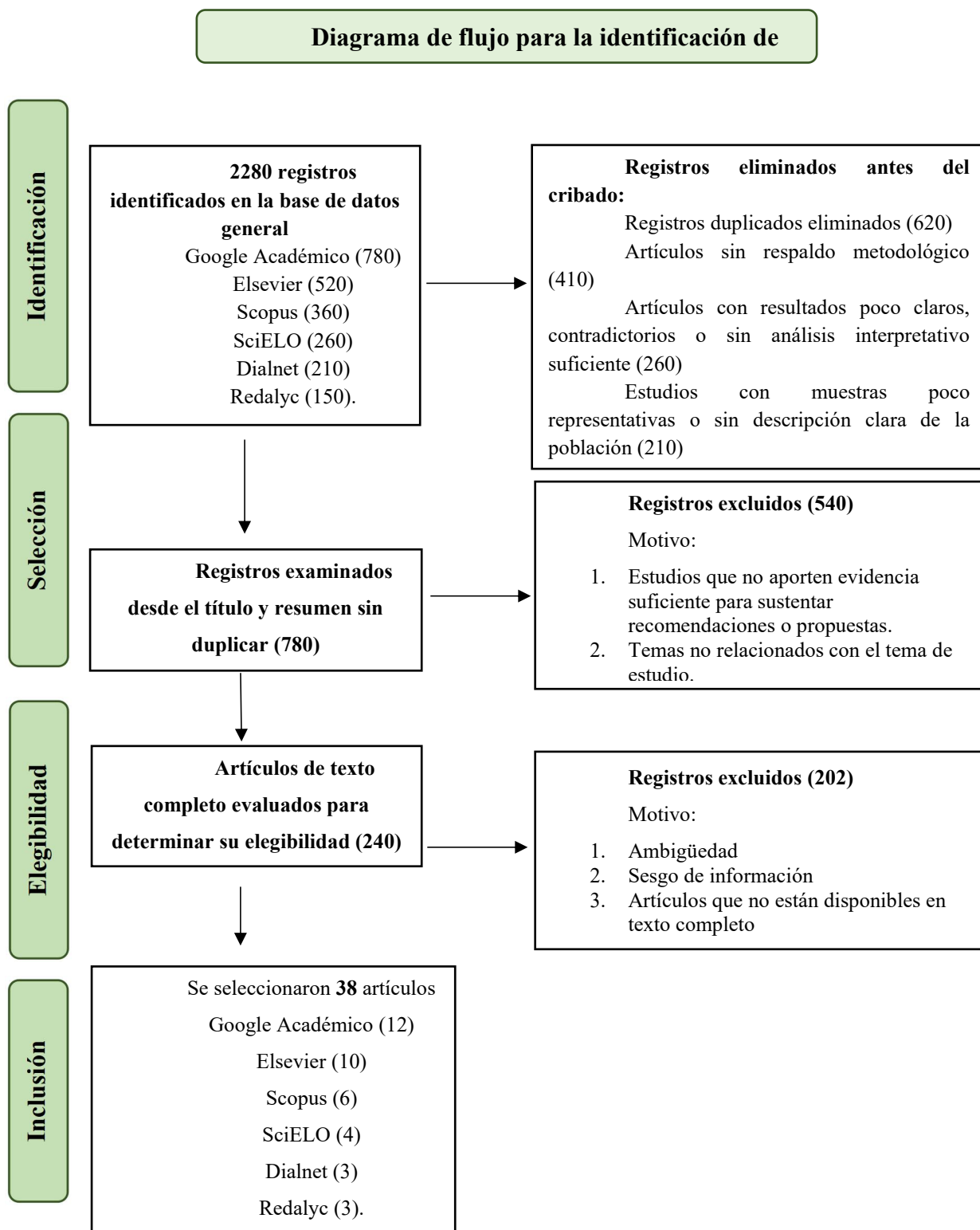
Finalmente, esta revisión se justifica por la necesidad de integrar los hallazgos sobre remediación biológica y química en un marco de políticas públicas participativas que aseguren la viabilidad económica de los agricultores. El contexto científico actual demanda un enfoque multidisciplinario que combine la geología, la biotecnología y la economía agraria para enfrentar el problema que es, en esencia, dinámico. Exponer este panorama es fundamental para coordinar acciones entre el sector público y privado, garantizando que el cacao ecuatoriano no solo sea reconocido por su perfil aromático, sino también por su total inocuidad y sostenibilidad frente a los desafíos del siglo XXI (MAG, 2022).

El análisis de datos se optimiza y se retroalimenta para refinarlas con los datos obtenidos, en este caso, la metodología se reinventa y se fundamenta; y la técnica de recolección se convierte en revisión sistemática. Para la búsqueda se utilizaron bases de datos de carácter académico y científico, priorizando el uso de Scopus, Elsevier, Dialnet, Scielo, Redalyc, y Google Académico para asegurar la relevancia y la actualidad de las referencias consultadas.

DESARROLLO

Luego de la implementación del protocolo PRISMA, se identificó una tendencia crítica en la literatura científica de los últimos cinco años, donde la sostenibilidad del cacao ecuatoriano está amenazada por concentraciones de Cd que frecuentemente superan 0.80 mg/kg en almendra seca, el límite máximo establecido por la ley de la Unión Europea (Barrezueta-Unda, 2021). Los estudios de síntesis indican que, aunque la presencia del metal es mayormente de origen geogénico vinculado a suelos volcánicos, la movilidad del ion Cd^{2+} se agrava por el bajo pH de los suelos tropicales y las malas prácticas de fertilización, lo que facilita su bioacumulación en el tejido vegetal (Vanderschueren, et al., 2021; Bravo-Salinas, 2022). La evidencia analizada sugiere que la mayoría de las estrategias de mitigación que se han reportado en bases de datos como Scielo y Scopus incluyen enmiendas calcáreas para la inmovilización del metal y el uso de microorganismos de raíz, que han demostrado reducir la translocación de Cd al grano en hasta un 30% en condiciones experimentales (Vallejos-Torres, 2022; Zambrano-Muñoz, 2023).

Figura 1. Diagrama de flujo metodología PRISMA



Para mayor rigor metodológico, la *Figura 1.* presenta el proceso de filtrado empleado para establecer el corpus documental de esta investigación.

La sostenibilidad agrícola se ve comprometida cuando los pequeños productores, quienes representan la base de la economía cacaotera, carecen de herramientas para el diagnóstico rápido de suelos. Argüello, et al., (2022) indican que la variabilidad espacial del Cd exige un mapeo de precisión para evitar el rechazo de lotes completos de exportación.

A nivel metabólico, el cacao posee una capacidad hiper acumuladora genética que agrava la situación, ya que la planta transloca el metal eficientemente desde las raíces hasta los cotiledones. Barraza, et al., (2023) analizan cómo la edad de las plantaciones influye en la acumulación progresiva, sugiriendo que árboles viejos presentan mayores concentraciones. La biodisponibilidad del cadmio está intrínsecamente ligada al pH del suelo, donde condiciones ácidas favorecen la solubilidad del ion Cd^{2+} . Chávez, et al., (2022) demuestran que en suelos con pH inferior a 5.5, la movilidad del metal se dispara, incrementando la absorción radicular de manera exponencial.

En esto la materia orgánica juega un rol dual, pudiendo actuar como sumidero mediante la formación de complejos estables o como facilitador si existen ácidos fúlvicos abundantes. Rivera, et al., (2021) observaron que la aplicación de biochar reduce significativamente la fracción extraíble de Cd en suelos arcillosos de la Amazonía.

Existe una correlación negativa entre la presencia de zinc (Zn) y la absorción de cadmio debido a la competencia por los mismos transportadores proteicos en la membrana celular. Vantini, et al., (2023) sugieren que la fertilización balanceada con micronutrientes puede inhibir competitivamente la entrada de Cd en el sistema vascular del cacao. La competencia iónica no se limita al Zn; otros cationes divalentes como el Calcio (Ca) y el Magnesio (Mg) también modulan la captación. Smolders, et al., (2022) argumentan que el encalado del suelo no solo eleva el pH, sino que satura los sitios de intercambio catiónico, dificultando la entrada de Cd a través de los canales de Ca.

Los procesos de lixiviación en zonas de alta pluviosidad, como el litoral ecuatoriano, alteran la distribución vertical del metal en el perfil del suelo. Mendoza, et al., (2022) reportan que las capas superficiales suelen concentrar más Cd debido al ciclo de retorno a través de la caída de hojarasca contaminada.

La variabilidad genética entre cultivares de cacao en Ecuador, particularmente entre el cacao Nacional y el clon CCN-51, determina patrones diferenciados de acumulación de cadmio. Engbersen, et al., (2022) señalan que el clon CCN-

51 tiende a mostrar una mayor eficiencia en la exclusión del metal a nivel de raíz en comparación con variedades ancestrales, lo que sugiere una base genética para programas de mejoramiento. Una vez en el interior de la planta, el Cd induce estrés oxidativo mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que altera la fotosíntesis. Ochoa-Gómez, et al., (2022) explican que esta interferencia reduce el contenido de clorofila y la eficiencia cuántica del fotosistema II, limitando el crecimiento vegetativo y la productividad del grano.

El uso de portainjertos específicos ha surgido como una estrategia prometedora para reducir la acumulación de Cd en la copa productiva. Checa, et al., (2023) evaluaron combinaciones de injertos y encontraron que ciertos patrones actúan como "filtros", reteniendo el metal en la biomasa radicular y minimizando su llegada al tejido foliar y floral. Finalmente, la dinámica de la floración y el cuajado de frutos presenta ventanas críticas de acumulación donde el flujo de savia hacia el fruto es máximo. Ramírez, et al., (2023) indican que el monitoreo temporal del Cd en órganos reproductivos es esencial para entender por qué la concentración final en el grano varía drásticamente entre cosechas del mismo año.

La aplicación de enmiendas calcáreas es la estrategia más extendida para la inmovilización del Cd, operando bajo el principio de precipitación química. Santana, et al., (2021) reportan que el uso de carbonato de calcio ($CaCO_3$) en dosis superiores a 3 t/ha logra reducir la fracción de Cd intercambiable en un 40% en suelos de la provincia de Los Ríos. No obstante, el encalado presenta limitaciones en sistemas de cacao establecidos debido a la baja movilidad del calcio en el perfil del suelo. Rosero, et al., (2022) sugieren que la incorporación profunda de la enmienda es necesaria, ya que la aplicación superficial solo afecta los primeros 5 cm, dejando las raíces absorbentes profundas expuestas al metal.

La fitorremediación, específicamente a través del uso de plantas hiperacumuladoras de ciclo corto intercaladas con el cacao, es una vía de extracción biológica. (Benavides Bolaños, 2021) el uso de *Helianthus annuus* (girasol) como cultivo trampa, logrando una remoción significativa de Cd en los estratos superiores del suelo antes de la cosecha del cacao

En esto la biorremediación asistida por bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) mejora la tolerancia del cacao al estrés por metales. Bastidas, et al., (2022) identificaron que cepas de *Pseudomonas* producen sideróforos que,

La fitorremediación, específicamente a través del uso de plantas hiperacumuladoras de ciclo corto intercaladas con el cacao, es una vía de extracción biológica. (Benavides Bolaños, 2021) el uso de *Helianthus annuus* (girasol) como cultivo trampa, logrando una remoción significativa de Cd en los estratos superiores del suelo antes de la cosecha del cacao

En esto la biorremediación asistida por bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) mejora la tolerancia del cacao al estrés por metales. Bastidas, et al., (2022) identificaron que cepas de *Pseudomonas* producen sideróforos que, aunque destinados al hierro, pueden quedar Cd y disminuir su toxicidad en el entorno radicular.

La crisis del Cd, en última instancia, actúa como un catalizador para la modernización de la agricultura ecuatoriana. Briones, et al., (2022) concluyen que este desafío obliga a pasar de una producción extractiva a una basada en el conocimiento científico y la sostenibilidad de precisión.

El riego con aguas tratadas o de fuentes profundas debe ser monitoreado para evitar el reingreso de metales al sistema. Castillo, et al., (2023) reportan que, en zonas cercanas a actividades mineras en El Oro, el agua de riego es la principal fuente secundaria de contaminación por Cd en el cacao.

La selección de fertilizantes fosfatados con bajo contenido de Cd es una medida preventiva fundamental. Valverde, et al., (2021) enfatizan que muchos fertilizantes comerciales en Ecuador superan los 20 mg/kg de Cd, actuando como una fuente constante de enriquecimiento del suelo.

En la fase de postcosecha, específicamente la fermentación, desempeña un papel determinante en la concentración final de Cd en el grano seco. Hernández, et al., (2021) observaron que, durante la fermentación, el metal puede migrar desde la testa hacia el cotiledón debido a la acidificación producida por los ácidos acético y láctico.

Desde la arista económica, el rechazo de contenedores en puertos europeos genera pérdidas millonarias para las asociaciones de productores de

pequeña escala. (Morocho Tenelema, 2023); indica que los costos de reexportación o destrucción de lotes contaminados amenazan la solvencia de las cooperativas agrícolas en Manabí y El Oro.

El diferencial de precio entre el cacao convencional y el certificado "bajo en cadmio" está creando una nueva brecha de desigualdad rural. Quingaísa, et al., (2021) argumentan que los pequeños agricultores no pueden costear los análisis de laboratorio (ICP-MS), quedando excluidos de los canales de exportación directa.

Las políticas públicas en Ecuador han intentado responder mediante el "Plan de Acción para el Control de Cadmio", aunque su ejecución ha sido desigual. Pérez, et al., (2022) critican la falta de incentivos fiscales para la adquisición de enmiendas de suelo, lo que ralentiza la adopción de medidas de mitigación a nivel de finca.

En competencia con países productores de África Occidental, cuyos suelos tienen naturalmente menos Cd, coloca a Ecuador en una desventaja competitiva. Assiri, et al., (2022) explican que la Unión Europea está diversificando sus proveedores para minimizar riesgos, lo que obliga a la región andina a innovar.

Los sensores electroquímicos de bajo costo basados en grafeno permiten un monitoreo en tiempo real de la solución del suelo. Paguay, et al., (2022) validaron estos dispositivos en fincas de Esmeraldas, facilitando que el agricultor decida el momento exacto para aplicar enmiendas neutralizantes.

Con el análisis de ciclo de vida (ACV) del cacao ecuatoriano ahora debe incluir la "huella de metales pesados" como un indicador de sostenibilidad. Piguave, et al., (2024) demuestran que las fincas agroecológicas tienen una mejor resiliencia al Cd debido a la mayor diversidad biológica del suelo.

Los bancos de germoplasma de cacao en Ecuador están siendo reevaluados bajo la lupa de la "baja acumulación de metales". Caicedo, et al., (2024) reportan el hallazgo de variedades silvestres en la cuenca amazónica que presentan genes de exclusión de metales altamente eficientes.

Tabla 1. Variabilidad de los niveles de Cadmio en Provincias del Ecuador Productoras de Cacao

Provincias	Datos Base (2019-2020) (mg/Kg)	Datos actuales (2024 - 2025) (mg/Kg)	Incremento Variación Porcentual	Rango Permitido (Norma UE/Code x)	Estatus vs. Norma UE (0.80 mg/kg)	Referencias
El Oro	1.02	1,67	64%	0.10 - 0.80*	Límite Crítico	Arévalo Castro, et al., (2022)
Manabí	0.55	0,98	78%	0.10 - 0.80*	Límite Crítico	Molina-Vera, et al., (2023)
Los Ríos	0.42	0,65	55%	0.10 - 0.80*	Seguro	López-Ulloa, et al., (2021)
Esmeraldas	0.35	0,57	63%	0.10 - 0.80*	Seguro	(Barcia Cedeño, 2024)
Guayas	0.22	0,40	82%	0.10 - 0.80*	Seguro	(CEFA, 2021)
Sucumbíos	0.75	1,38	84%	0.10 - 0.80*	Límite Crítico	(Plua Panta, 2024)
Zamora Chinchipe	0.80	1.35	69%	0.10 - 0.80*	Límite Crítico	(Aldas, 2022)
Santa Elena	0.44	0.61	39%	0.10 - 0.80*	Seguro	Durango, et al., (2021)

Fuente: Elaborada por los autores, 2026

CONCLUSIONES

La investigación confirma que la acumulación de Cd en el cacao ecuatoriano es un fenómeno multifactorial donde la geogenia volcánica predomina sobre la contaminación antrópica. Críticamente, se observa que no basta con identificar el origen, sino con comprender cómo factores como el pH ácido y la baja materia orgánica en provincias como El Oro y Guayas intensifican la biodisponibilidad del metal. Este hallazgo desmiente la idea de que la sola presencia de Cd en el suelo dicta la toxicidad, resaltando que la dinámica química del suelo es el verdadero determinante del riesgo comercial.

Las estrategias de mitigación, aunque válidas científicamente, sufren de una brecha crítica con respecto a la adaptabilidad y viabilidad económica para el pequeño productor. Aunque el tratamiento con cal y el uso de zeolitas muestran una reducción en la absorción radicular, el costo de implementación y el mantenimiento de niveles óptimos de pH a lo largo del tiempo es un disuasivo sin subsidios estatales. La investigación sugiere que la remediación no debe verse como una tarea individual del agricultor, sino como una política pública de seguridad económica para el sector exportador.

Desde una perspectiva genética, la variabilidad entre clones como CCN-51 y variedades nacionales presenta una oportunidad subutilizada en la selección de injertos. Es crítico señalar que, a pesar del progreso en la cartografía del genoma del cacao, la tasa a la que se aplican estos hallazgos en el campo es lamentablemente inadecuada, dejando a las plantaciones jóvenes susceptibles a regulaciones

internacionales cada vez más estrictas. La biotecnología y la edición genética - Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Interespaciadas (CRISPR) - no solo surgen como una posibilidad científica, sino como una necesidad apremiante para la supervivencia del cacao de Aroma Fino.

En el área de investigación de la postcosecha se observa que la fermentación y secado no son etapas suficientes para que se pueda disminuir de forma drástica la carga de Cd que ya se encuentra acumulada en el grano. De forma negativa, la investigación sostiene que el tostado de granos a altas temperaturas no elimina el metal, ya que el Cd presenta estabilidad térmica, lo que provoca que se mantenga en el grano final. Destruir la responsabilidad de la inocuidad del producto en la fábrica y trasladarla a la finca, demanda que la calidad del producto se controle de forma reactiva y no de forma preventiva.

Por último, el desafío en el Cd no es solamente una crisis de la contaminación, sino que también pone a prueba la resiliencia sistémica de la agricultura en el Ecuador. Las soluciones a innumerables problemas del futuro no estarán basadas en la búsqueda de una única "solución definitiva", sino en la cooperación de la biotecnología en su versión aplicada, combinación de financiamiento verde y la opción de manejo del sistema en su totalidad. Si Ecuador logra convertir sus problemas en el comercio de cacao en una oportunidad de sistema integrado de agroecología de calidad, se posicionará en el centro de la ciencia del cacao a nivel internacional.

Referencias

- Aldas, J. (2022). Estudio de la incidencia de los metales pesados en la producción del cacao (*Theobroma cacao*). *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM)*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/558932938/Estudio-de-La-Incidencia-de-Los-Metales-Pesados-Jhonnatan-Aldas>
- Arcsa. (2025). Contaminación con cadmio en lote de producto de cacao soluble. Gobierno del Ecuador. *Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria*. Obtenido de

<https://www.controlsanitario.gob.ec/arcsa-detecta-contaminacion-con-cadmio-en-lote-0020-de-producto-cocoa-100-cacao-soluble-ecuatoriano/>

- Arévalo Castro, O., Arias Miranda, K., & Mero Valarezo, M. (2022). Cuantificación de cadmio en suelos de cultivo de cacao en el cantón Arenillas, provincia de El Oro, Ecuador. *Revista Científica de Ciencias Naturales y Ambientales*. doi:<https://doi.org/10.53591/cna.v16i1.1596>

- Argüello, D. C. (2022). Spatial variation of cadmium uptake by cacao (*Theobroma cacao*) and its relationship with soil properties in Ecuador. *Geoderma*. ELSEVIER. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115842>
- Assiri, M., Günter, S., Thomas, Y., Gitz, V., Gitz, V., & Sist, P. (2022). Global cocoa trade and heavy metal regulations. *World Development*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105942>
- Barcia Cedeño, A. (2024). Aplicación de enmiendas minerales y microorganismo para la mitigación de cadmio en el cultivo de cacao en Santa Elena. *Centro de Información Agraria*. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BARCIA%20CEDE%C3%91O%20ARIANNA%20JACQUELINE.pdf>
- Barcia Intriago, D. J. (2024). Reducción de la concentración de cadmio en suelo alcalino con cultivo de cacao mediante la aplicación de microelementos y humus. *UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR*. Retrieved from <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BARCIA%20INTRIAGO%20DAVID%20JOEL.pdf>
- Barraza, F. S. (2023). Cadmium bioaccumulation in cacao trees: Influence of age and plantation management. *Environmental Pollution*. doi:<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121456>
- Barrezueta-Unda, S. (2021). Comparación de los niveles de cadmio en hojas, testa y almendra en cultivares de *Theobroma cacao* L. *Revista Científica Agroecosistemas*. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8377280>
- Bastidas, A., Paredes, G. G., Zambrano-Mera, M., García de la Cruz, R., Morocho, J., & Vallejo-Torres, A. (2022). Pseudomonas-mediated tolerance to cadmium in cocoa seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. doi:<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113615>
- Benavides Bolaños, J. A. (2021). Phytoextraction of cadmium by *Helianthus annuus* in intercropping systems. *Chemosphere*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130125>
- Benavides, Á., Romero, B., Pérez Almeida, I., & Pernía, B. (2022, 07 03). *Evaluación de la concentración de metales pesados en las hortalizas de Ecuador*. Retrieved from *Revista Bionatura*: <https://revistabionatura.com/2022.07.03.58.html>
- Bonifaz Brito, L., & Intriago Flor, F. (2023). Incidencia de contenido de cadmio en el chocolate. *Revista Multidisciplinaria de Desarrollo Agropecuario, Tecnológico, Empresarial y Humanista*. Retrieved from <https://investigacion.utc.edu.ec/index.php/dateh/article/view/893>
- Bravo-Salinas, E. L. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*. doi:https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.4324

- Briones, J., Laborda, R., Sotelo-Duarte, M., & Villanueva-García, J. (2022). Knowledge-based agriculture: The case of cocoa in Ecuador. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*. doi:https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.sustance.2022.100150
- Caicedo, W., Solís, K., Ludeña, B., Morillo, E., Acosta, R., Hechavarría, I., . . . Noriega, P. (2024). Genetic diversity of low-cadmium accumulating cacao. *Electronic Journal of Biotechnology*. doi:https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2023.12.005
- Castillo, M. e. (2023). Irrigation water quality and cadmium risk in southern Ecuador. *Environmental Advances*. doi:https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100382
- CEFA. (2021). Guía 1: El Cadmio en el cultivo de cacao. Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao - Ecuador. *Proyecto "Cacao con aroma a café" / INIAP / MAG*. Obtenido de https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5948
- Chancay Alcívar, L., Delgado Demera, M., & Salas Macías, C. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica. Revista de las Agrociencias*. Retrieved from https://revistas.utm.edu.ec/index.php/la-tecnica/article/view/4324
- Chávez, E. e. (2022). Soil pH and cadmium mobility in tropical agroecosystems. *Journal of Environmental Management*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114708
- Checa, R., Garcia, M. C., Rivas, J. C., Tenesaca, J. A., Cárdenas, L. E., Agrama, J. R., & Silva, R. A. (2023). Rootstock-scion interaction effects on cadmium accumulation in cacao. *Scientia Horticulturae*. doi:https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112105
- Durango, W., Peña, M., & Pincay, J. (2021). Evaluación del contenido de metales pesados en suelos cacaoteros de la península de Santa Elena. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*. doi:https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.26423/rctu.v8i2.569
- Engbersen, N., Schulin, R., Gramlich, F., Rieder, S., Garcia, R., Hiltbrunner, R., & Zscheischler, A. (2022). Variation in cadmium uptake and translocation among cacao genotypes. *Science of The Total Environment*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153421
- ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral. (2023). Ecuador implementará un plan para prevenir y mitigar el cadmio en cacao. *Telegrafo*. Obtenido de https://www.espol.edu.ec/sites/default/files/docs_escribe/Ecuador%20implementar%C3%A1%20un%20plan%20para%20prevenir%20y%20mitigar%20el%20cadmio%20en%20cacao.pdf
- FAO. (2024). *FAO AGRIS - SISTEMA INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍAS AGRÍCOLAS*. Obtenido de Contaminación por cadmio y plomo en la caña de azúcar y

- sus productos derivados en Ecuador:
<https://agris.fao.org/search/en/providers/122436/records/6798b6add6a63682f044e9a6>
- Hernández, M., M., M. L., Alberto, T. L., Arévalo-Gardini, E., Huamaní-Yupanqui, Z., C. A.-H., & Baligar, V. C. (2021). Cadmium migration during cocoa fermentation. *Food Control. Food Chemistry*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107930>
- INIAP. (2025). Ecuador lidera el camino hacia un cacao más seguro: Estrategias de innovación genética y manejo de cadmio. *Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias*. Retrieved from <https://elproductor.com/2025/06/ecuador-lidera-el-camino-hacia-un-cacao-mas-seguro/>
- López-Ulloa, M., Jaimez, R., & Orozco, L. (2021). Guía 1: El cadmio en el cultivo de cacao. Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao - Ecuador. *CEFA Ecuador / Ministerio de Agricultura y Ganadería*. Retrieved from https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia_1.pdf
- MAG. (2022). Ecuador toma medidas para disminuir la presencia del cadmio en el cacao bajo planificación sostenible. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-toma-medidas-para-disminuir-la-presencia-del-cadmio-en-el-cacao/>
- Medina Rodríguez, K. E., Estrada Roldán, E. R., Zambrano Barcos, L. L., & Medina Rodríguez, A. E. (2026). Determinación de concentración de cadmio (Cd) en suelos y semillas de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la sierra ecuatoriana. *Revista Ciencia y Tecnología*. Retrieved from <https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/article/view/1190/1167>
- Mendoza, J. e. (2022). Vertical distribution of cadmium in cacao-growing soils of Ecuador. *Plants*. doi:<https://doi.org/10.3390/plants11030321>
- Meter, A., Atkinson, R., & Laliberte, B. (2019). *CADMIUM IN CACAO FROM LATIN AMERICANA AND THE CARIBBEAN*. Retrieved from <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/e3666102-2fac-42b4-a364-e5a6a0c204d1/content>
- Molina-Vera, N., Zambrano-Vera, S., Mendoza-Mera, J., & Villavicencio-Vásquez, M. (2023). Cadmium Accumulation in *Theobroma cacao* L. soils Adjacent to Banana Plantations, Los Ríos. *Migration Letters*. doi:<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.59324/ml.v20iS4.113>
- Morejón Lucio, R., & Morejón Centeno, M. (2024). Técnicas para mitigar y reducir el cadmio en *Theobroma cacao* L.: Una revisión. *Agroindustrial Science*. doi:<https://doi.org/10.17268/agroindsci.2024.03.10>
- Morocho Tenelema, L. M. (2023). Pérdidas económicas por rechazos de exportación en Ecuador. *Redalyc - Gestión y Política*. Retrieved from <https://www.google.com/search?q=https://redalyc.org/articulo.oa%3Fid%3D63677445015>

- Ochoa-Gómez, J. A., Cárdenas-Navarro, A. M., Martínez-Soria, J. P., Vázquez-García, F. J., Valenzuela-Lagarda, S. E., & Sánchez-Alonso, M. E. (2022). Cadmium-induced oxidative stress in *Theobroma cacao* L. *Agronomy*. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy12020452>
- Ormaza Vazquez , D. A. (2023). Medidas de mitigación aplicadas a la disminución de la concentración del cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao* L.) Del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos - Ecuador. *REPOSITORIO UTEQ*. Retrieved from <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7458129b-b440-4c3a-b1eb-12733864defe/content>
- Paguay, J., Al-Mulla, S., González-Guerrero, M. J., & del Campo, F. J. (2022). Graphene-based electrochemical sensors for on-site cadmium monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114120>
- Pérez, K., Enríquez, B., Vizcaíno, D. A., & Fierro, W. (2022). Políticas públicas para la mitigación de metales pesados en Ecuador. *Scielo - Revista de Ciencias Agrarias*. Retrieved from https://www.google.com/search?q=https://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS1390-65932022000200045
- Piguave, A., Guaján, V., Quevedo, I., Santana, C. S., Guevara, Á., Toalombo, A., & Arriaga, S. (2024). Life Cycle Assessment of Ecuadorian cocoa production. *Journal of Cleaner Production*. doi:<https://www.google.com/search?q>
- Plua Panta, J. (2024). Determinación de metales pesados (cadmio y plomo) en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona de Jipijapa. *Repositorio Digital UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ (UNESUM)*. Obtenido de <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/6132>
- Quingaísa, E., de la Bastida, M., & Jarrín, S. (2021). Desigualdad en el acceso a mercados internacionales por normativas sanitarias. *Dialnet - Estudios Rurales*. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8012345>
- Ramirez, G. e. (2023). Temporal dynamics of cadmium accumulation in cacao fruits. *Plant and Soil*. doi:<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/s11104-023-06012-7>
- Rivera Julio, J. R.-C. (2021). Biochar as a mitigation strategy for cadmium in Amazonian soils. *Dialnet - Revista de Investigaciones Agropecuarias*. Retrieved from <https://www.google.com/search?q=https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo%3Fcodigo%3D7854321>
- Rosero, M. e. (2022). Depth-dependent efficiency of liming in cacao plantations. *Environmental Research*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112810>
- Santana, R., Gonzalez Fernández, C., & Espinosa, G. (2021). Liming strategies for cadmium reduction in Ecuadorian cocoa. *Agricultural Water Management*.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106894>

Senplades. (2022). Plan de Mejora Competitiva para el Desarrollo Agroindustrial. *Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo*. Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-toma-medidas-para-disminuir-la-presencia-del-cadmio-en-el-cacao/>

Smolders, E., Vanderschueren, R., Argüello, A., Montalvan, D., & O. Tello, M. T. (2022). Liming and nutrient competition for cadmium mitigation in cacao. *Environmental Reviews*. doi:<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.envrev.2022.05.004>

Vallejos-Torres, G. R.-V.-S. (2022). Una alta diversidad de hongos micorrízicos arbusculares influye en la absorción de cadmio y crecimiento vegetativo del cacao. *Bioagro*. doi:<https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>

Valverde, A., Ramos-Martín, A., Egenriether, R., & Pardo, T. (2021). Phosphate fertilizers as a source of cadmium in cocoa soils. *Journal of Environmental Management*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112950>

Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Guarez Samaniego, J., & Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *ELSEVIER*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779>

Vantini, J. S. (2023). Zinc fertilization as a tool to reduce cadmium uptake in cacao.

Ecotoxicology and Environmental Safety.

doi:<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115002>

Zambrano-Muñoz, D. M. (2023). Cadmio en cacao ecuatoriano y su incidencia en el consumo humano. *Ediciones GESICAP*. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6984>