

Artículo Científico

Contaminación por cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) procedentes del cantón Quinindé, Ecuador

*Cadmium contamination in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) from Quinindé canton, Ecuador*

 Barragan-Monrroy, Roberto Johan ¹
 <https://orcid.org/0000-0003-4682-5529>
 roberto.barragan2014@uteq.edu.ec
 Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo

 Riasco-Delgado, Nathaly Narcisa ²
 <https://orcid.org/0009-0003-6080-6049>
 nriascod@uteq.edu.ec
 Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo

 Diaz-Ponce, Mariela Alexi ³
 <https://orcid.org/0000-0001-8944-5994>
 mdiaz@uteq.edu.ec
 Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo

 Sabando-Cedeño, Carla Maria ⁴
 <https://orcid.org/0009-0001-0925-0159>
 carlacedsab2001@gmail.com
 Universidad Internacional de la Rioja, España, La Rioja

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n3/263>

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo evaluar las concentraciones de cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) comercializadas en el cantón Quinindé, Ecuador. Se seleccionaron cuatro locales principales de comercialización y un área de cultivo como muestra testigo. Las muestras fueron recolectadas en tres réplicas mensuales a lo largo de un trimestre, y posteriormente analizadas mediante espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, con el fin de determinar la concentración de cadmio presente. Para el procesamiento estadístico de los datos se empleó el programa INFOSTAT, aplicando la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, junto con el test no paramétrico de Kruskal-Wallis, debido a la distribución de los datos. Los valores obtenidos fueron comparados con los límites máximos establecidos por marcos regulatorios tanto nacionales como internacionales, incluyendo el Codex Alimentarius, la normativa CE 1881/2006, la Propuesta 65 del estado de California, la RDC 42 de Brasil y el estándar chino GB 2762-2017. Dentro del conjunto de análisis, la muestra identificada como T1M presentó la mayor concentración de cadmio, registrando un valor de 0,90 mg/kg, cifra que supera los parámetros permitidos por Brasil (0,5 mg/kg) y China (0,3 mg/kg). En promedio, las concentraciones registradas en las muestras se ubicaron en 0,70 mg/kg. Además, la estimación del impacto ambiental arrojó indicadores de 1,98 y 0,3, evidenciando un nivel considerable de afectación ecológica.

Palabras clave: Metales pesados, Remoción, Seguridad alimentaria, Impacto Ambiental.



Check for updates

Received: 15/Jul/2026
Accepted: 06/Ago/2026
Published: 20/Sep/2026

Cita: Barragan-Monrroy, R. J., Riasco-Delgado, N. N., Diaz-Ponce, M. A., & Sabando-Cedeño, C. M. (2026). Contaminación por cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) procedentes del cantón Quinindé, Ecuador. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 4(3), 688-711.
<https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n3/263>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editoriagrupo-aea.com

© 2026. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The present study aimed to evaluate cadmium concentrations in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) marketed in the canton of Quinindé, Ecuador. Four main marketing locations and a cultivation area were selected as a control sample. Samples were collected in three monthly replicates over the course of a three-month period and subsequently analyzed by graphite furnace atomic absorption spectrometry to determine the cadmium concentration present. The INFOSTAT program was used for statistical processing of the data, applying the Shapiro-Wilk normality test, along with the nonparametric Kruskal-Wallis test, due to the data distribution. The obtained values were compared with the maximum limits established by both national and international regulatory frameworks, including the Codex Alimentarius, EC Regulation 1881/2006, California Proposition 65, Brazilian RDC 42, and the Chinese standard GB 2762-2017. Within the analysis set, the sample identified as T1M had the highest cadmium concentration, registering a value of 0.90 mg/kg, exceeding the permitted limits for Brazil (0.5 mg/kg) and China (0.3 mg/kg). On average, the concentrations recorded in the samples were 0.70 mg/kg. Furthermore, the environmental impact estimates yielded indicators of 1.98 and 0.3, demonstrating a significant level of ecological impact.

Keywords: Heavy Metals, Removal, Food Safety, Environmental Impact.

1. Introducción

La contaminación ambiental causada por los metales pesados es un problema creciente a nivel mundial, con implicaciones graves el suelo y la salud humana. Entre estos metales, el cadmio se destaca por su alta toxicidad y persistencia en el ambiente, en donde el Ecuador, es uno de los países más afectados por la presencia de cadmio en la producción de cacao.

El cadmio, al ser un metal altamente tóxico con una gran capacidad de persistir en el suelo durante largos períodos debido a su baja degradación microbiana y química, puede ser absorbido por el cacao (*Theobroma Cacao* L.) y acumulado en sus almendras. La gravedad de este metal depende de su toxicidad específica, bioacumulación, persistencia y no biodegradabilidad (Huaraca-Fernandez et al., 2020).

El cacao (*Theobroma cacao* L.), conocido como la “Pepa de Oro”, es uno de los frutos más representativos dentro del Ecuador, destacándose a nivel internacional como proveedor del 60% de la producción mundial de cacao. En el año 2018, las exportaciones de cacao ecuatoriano aumentaron un 12,79%, siendo Europa uno de los principales destinos. Sin embargo, la presencia de cadmio en estos productos

puede tener graves repercusiones tanto para los consumidores como para los agricultores (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2019)

En la actualidad, el uso intensivo de prácticas agrícolas inadecuadas en el manejo de suelos y recursos hídricos ha favorecido la acumulación de cadmio en las plantaciones de cacao, comprometiendo tanto la calidad del producto como la integridad de los ecosistemas acuáticos y la salud de los consumidores (Perea et al., 2022). Frente a esta problemática, se vuelve prioritario aplicar estrategias de remediación efectivas que contribuyan a disminuir los niveles de este metal en los cultivos y reduzcan sus impactos ambientales y sanitarios.

En el cantón Quinindé, perteneciente a la provincia de Esmeraldas, el cultivo de cacao representa una de las principales fuentes de ingresos para la población local. Los productores dependen de la calidad e inocuidad de sus cosechas para garantizar su sustento y mantener vínculos comerciales con mercados internacionales (Perea et al., 2022). No obstante, la detección de cadmio en las almendras de cacao cultivadas en esta zona ha generado importantes desafíos, tanto en términos de cumplimiento normativo como de sostenibilidad agrícola.

La contaminación por cadmio en suelos agrícolas representa una preocupación ambiental y sanitaria de alto impacto, vinculada directamente con el cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Uno de los más relevantes es el ODS 3, orientado a garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2023). La exposición crónica a este metal pesado puede desencadenar efectos tóxicos significativos en la salud humana, como deterioro de la función renal, fragilidad ósea y un aumento en la probabilidad de desarrollar ciertos tipos de cáncer.

Además, hace hincapié al ODS 12 (Producción y consumo responsables), el cual busca equilibrar el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental y el bienestar social, asegurando que las actividades productivas y de consumo actuales no comprometan la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades; y por último el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), aquel busca gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación, detener e invertir la degradación de la tierra y detener la pérdida de biodiversidad.

Esta investigación tiene como propósito principal analizar las concentraciones de cadmio presentes en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) que se comercializan en el cantón Quinindé, Ecuador. Para ello, se efectuó una evaluación basada en los datos obtenidos a partir del análisis de muestras recolectadas en distintos establecimientos del cantón. Las determinaciones analíticas se realizaron mediante espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, técnica que permitió cuantificar con precisión los niveles de cadmio presentes en las muestras (Barragán et al., 2022).

2. Materiales y métodos

En el cantón Quinindé, la determinación de cadmio en granos de cacao se realizó mediante un muestreo aleatorio triplicado, garantizando la confiabilidad de los resultados a través del uso de muestras testigo. El procedimiento incluyó la identificación de los principales puntos de comercialización de cacao, todos con niveles de humedad entre el 55 % y 60 %. Para seleccionar los sitios representativos, se aplicaron técnicas de observación directa y análisis del flujo de compradores, priorizando aquellos con mayor volumen y frecuencia en las transacciones. Esta estrategia permitió que los datos recolectados reflejaran de forma precisa las dinámicas del mercado local. La inclusión de muestras testigo proporcionó un mecanismo de control adicional, fortaleciendo la objetividad y consistencia de las mediciones obtenidas.

La selección de los locales comerciales se basa en la necesidad de obtener una muestra representativa y manejable que refleje adecuadamente las prácticas y condiciones locales sin comprometer la viabilidad del estudio. Los locales seleccionados fueron aquellos con mayor relevancia en el mercado local y una fuerte conexión con los agricultores de Quinindé (Prado-Chinga, 2022).

Para ello, se realizaron entrevistas a los dueños con el fin de garantizar la representatividad de la muestra, permitiendo conocer de manera directa la procedencia del cacao adquirido, asegurando que las prácticas locales estén adecuadamente reflejadas en el estudio, para obtener información de primera mano sobre la procedencia del cacao; lo cual facilitó seleccionar los locales estratégicos, asegurando que las muestras recolectadas sean representativas, permitiendo identificar de manera precisa los vínculos entre los locales comerciales y los agricultores de Quinindé (Barragán et al., 2022).

En cada uno de los establecimientos agrícolas seleccionados, se recolectaron mensualmente muestras de almendras de cacao mediante un muestreo aleatorio triplicado ($n=3$). La implementación de réplicas en este tipo de análisis es una práctica fundamental en estudios alimentarios, ya que permite reducir la variabilidad, mejorar la representatividad de los resultados y asegurar su reproducibilidad, en concordancia con estándares establecidos por organismos internacionales (Codex Alimentarius Commission, 2019). Cada unidad muestral fue debidamente rotulada con información precisa sobre su procedencia, número de lote y características particulares del producto, garantizando así la trazabilidad y la coherencia en el tratamiento de los datos (Barragán et al., 2022; Toscano-Quispe et al., 2026).

Método analítico

Una vez almacenadas las muestras de almendras de cacao, estas fueron procesadas en un laboratorio certificado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano, asegurando el cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025. El objetivo de este proceso es realizar la cuantificación de cadmio empleando la técnica de espectrometría de absorción

atómica con horno de grafito, conforme al método "Standard Methods 3111B Modificado".

Se realizó la verificación del método analítico evaluando los parámetros de linealidad, precisión, veracidad e incertidumbre, a partir de material certificado, para determinar su contenido en Cd, previa verificación de estado de calibración de los instrumentos y materiales volumétricos a utilizar (Araujo-Abad et al., 2020).

La técnica GFAAS, permitieron reducir los límites de detección hasta el nivel de partes por billón (ppb) utilizando equipos relativamente simples, evitando los esfuerzos y el tiempo perdido asociados con las técnicas que requieren extracción previa; cabe recalcar que el método se centró en dos procesos principales: la pulverización de la muestra y la captación de radiación emitida por una fuente mediante los átomos libres, pero el manejo de la muestra antes de pulverizarla incluyó las siguientes fases: secado, calcinado y atomización (Araujo-Abad et al., 2020).

Calibración del instrumento

La determinación precisa de cadmio en almendras de cacao requiere una calibración rigurosa del equipo de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito. Este procedimiento garantiza la confiabilidad de los valores obtenidos durante el análisis. A continuación, se detallan las etapas necesarias para llevar a cabo la calibración del instrumento y la elaboración de las curvas estándar que permiten establecer la relación entre la señal absorbida y las concentraciones conocidas del analito.

Preparación de soluciones estándar

Las soluciones estándar de cadmio se prepararon a partir de una solución madre con una concentración de 100 mg/L. A partir de esta, se realizaron diluciones sucesivas con el fin de generar un rango de concentraciones adecuado para la construcción de la curva de calibración. En todos los casos, se empleó ácido nítrico al 1 % v/v como medio de dilución, el cual actuó también como solución matriz durante las mediciones, garantizando uniformidad en las condiciones analíticas y mejorando la exactitud en la detección del analito.

Establecimiento de curvas de calibración

Para la elaboración de las curvas de calibración, se midió la absorbancia de las soluciones estándar mediante un espectrofotómetro de absorción atómica. Cada medición se repitió con el fin de garantizar la consistencia de los resultados obtenidos. Posteriormente, los valores de absorbancia fueron representados gráficamente en función de las concentraciones conocidas de cadmio, permitiendo así trazar la curva de calibración correspondiente.

Programación del método en el software

Se utilizó el software del espectrofotómetro de absorción atómica (Analyst 200 de Perkin Elmer®) para programar el método analítico. El software permitió la

configuración de los parámetros de medición específicos, incluyendo la longitud de onda, la temperatura del horno de grafito, y los tiempos de atomización, posteriormente se ingresaron los datos de las soluciones estándar para que el software pueda construir y almacenar la curva de calibración.

Análisis de las muestras

Con el objetivo de lograr una cuantificación exacta del cadmio (Cd) presente en almendras de cacao, se aplicaron procedimientos analíticos específicos. Previo a las mediciones, el equipo fue acondicionado mediante un enjuague con una solución de ácido nítrico al 1%, a fin de evitar interferencias causadas por residuos o contaminantes (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 1996). La determinación del cadmio se efectuó utilizando espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, una técnica instrumental que brinda alta sensibilidad y permite la detección de concentraciones en el rango de trazas, superando en precisión a métodos convencionales como la llama directa (International Organization for Standardization, 2017).

Las soluciones de las muestras preparadas se inyectaron en el tubo de grafito, donde fueron sometidas a un programa de calentamiento controlado en varias etapas (secado, calcinación, atomización y limpieza), para garantizar una adecuada atomización del analito y minimizar interferencias. La absorbancia fue medida en mg/L, y la cuantificación se realizó de manera automatizada mediante el software del espectrofotómetro de absorción atómica, como el Analyst 200 de Perkin Elmer®, asegurando la reproducibilidad y exactitud de los resultados (Rajeswari & Priyadharshini, 2021).

El procesamiento de los datos se llevó a cabo utilizando el software integrado del espectrofotómetro, lo que permitió reducir la intervención manual y aplicar directamente las curvas de calibración previamente construidas para estimar con precisión las concentraciones de cadmio en las muestras de almendras de cacao (Rajeswari & Priyadharshini, 2021). Para garantizar la confiabilidad del procedimiento analítico, se aplicaron controles de calidad internos, como el empleo de materiales de referencia certificados (CRM) y la ejecución de análisis por duplicado. En los casos que lo ameritaban, los ensayos fueron repetidos con el fin de verificar la reproducibilidad de los resultados, conforme a los lineamientos establecidos en la norma ISO/IEC 17025:2008.

Tratamientos de los datos

Para evaluar si existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en las concentraciones de cadmio (Cd) en almendras de cacao procedentes de los locales comerciales agrícolas y las muestras testigo, se llevó a cabo un análisis estadístico detallado. Primero, se realizó una prueba de normalidad en los datos obtenidos para determinar si siguen una distribución normal, se realizó la prueba de normalidades Shapiro Wilks, si los datos resultaban normales se aplica ANOVA y si no representaba una distribución

normal Kruskal Wallis, utilizando el software estadístico INFOSTAT. El Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para comparar las concentraciones de cadmio entre los diferentes comerciales agrícolas. En caso de encontrar diferencias significativas en el ANOVA, se aplicó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey, que identificó específicamente entre qué grupos existen diferencias significativas (Barragán et al., 2022).

Se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis para analizar diferencias significativas en las medianas de las concentraciones de cadmio entre varios puntos de venta agrícola. Los resultados fueron organizados en tablas y representaciones gráficas, lo que permitió una interpretación clara de los datos. Este procedimiento fortaleció la consistencia de los hallazgos, permitiendo establecer conclusiones confiables respecto a las variaciones en los niveles de cadmio, con implicaciones directas en el análisis del riesgo ambiental y la inocuidad alimentaria en el cantón Quinindé.

Niveles de cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) comercializadas en el cantón Quinindé, con las normativas nacionales e internacionales

Para comparar las concentraciones de cadmio (Cd) presentes en las almendras de cacao comercializadas en el cantón Quinindé, se tomó como base las normas nacionales e internacionales referente a los niveles máximos y límites máximos permisibles establecidos en las normas RTE INEN 488, Unión Europea, Resolución - RDC N° 42 en Brasil, la Unión Europea, Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao, Norma GB 2762-2017 en China y Codex Alimentarius (Tabla 9).

Tabla 1

Niveles y límites máximos permisibles establecidos en las diferentes normas nacionales e internacionales

Normativa	Cantidad	Unidad
RTE INEN 488	0,8	mg/kg
Reglamento (CE) No 1881/2006 (Unión Europea)	0,8	Mg mg/kg
Resolución - RDC N° 42 en Brasil	0,3	mg/kg
Norma GB 2762-2017 en China	0,5	mg/kg
Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao	0,8	mg/kg
Codex Alimentarius	0,8	mg/kg

Nota: (Autores, 2026).

Impacto ambiental por cadmio en almendras de cacao comercializados en el cantón Quinindé, Ecuador

Para evaluar el impacto ambiental de las concentraciones de cadmio (Cd) en las almendras de cacao comercializadas en el Cantón Quinindé, se utilizó como referencia la ecuación propuesta por Arada et al. (2017) (Ecuación 1). Según esta metodología, un impacto ambiental positivo (+) representa un daño ambiental

significativo, mientras que un valor negativo (-) indica que no hay una afectación severa al entorno.

La detección de valores que exceden los límites permitidos por la normativa vigente permite identificar con claridad el grado de contaminación por cadmio en las almendras de cacao (Torres-Cobo & Muñoz-Tarira, 2026). Esta información facilita la comparación con los estándares internacionales de inocuidad, aportando criterios objetivos para evaluar el riesgo asociado al consumo de este producto.

Ecuación 1

Ecuación para determinar el impacto ambiental

(Impacto Ambiental = $P_A - P_{NC}$)

Donde:

P_A : valor del parámetro determinado en las muestras de cacao

P_{NC} : valor del parámetro reportado en la RTE INEN 488, Unión Europea, Resolución - RDC N° 42 en Brazil, la Unión Europea, Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao, Norma GB 2762-2017 en China y Codex Alimentarius.

Tratamiento de datos

Para evaluar si existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en los impactos ambientales en almendras de cacao procedentes de los comerciales agrícolas, se llevó a cabo un análisis estadístico detallado. Primero, se realizó una prueba de normalidad en los datos obtenidos para determinar si siguen una distribución normal o anormal. En caso de que siguieran una distribución anormal, se aplicaba Kruskal Wallis, y en caso de que fuera normal, se empleó un análisis de Varianza, y se ejecutó utilizando el software estadístico INFOSTAT.

3. Resultados

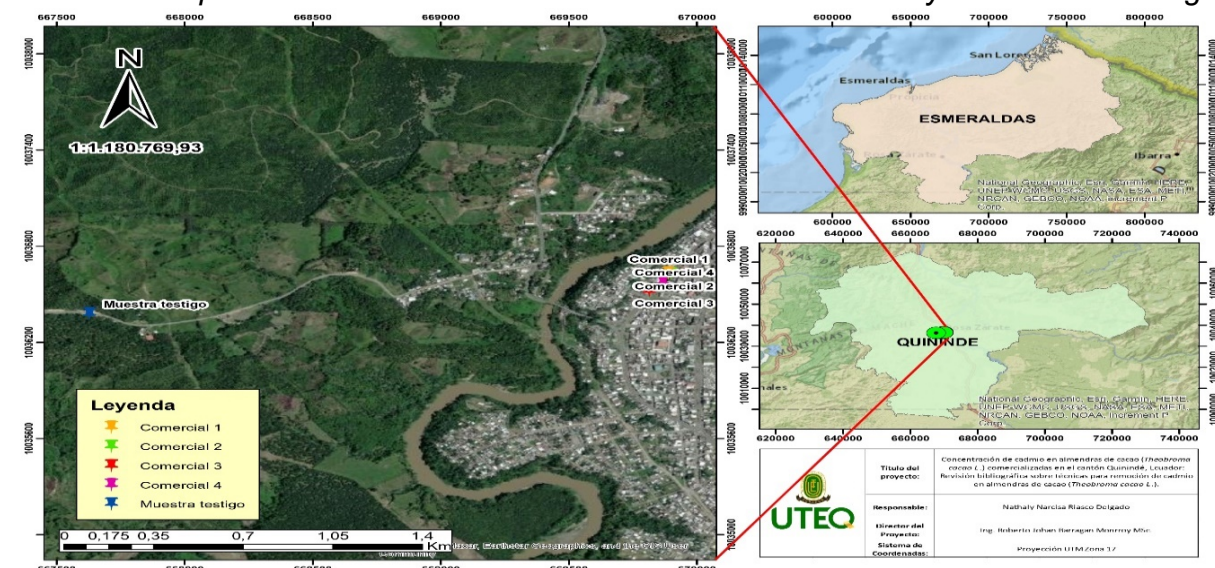
3.1. Cuantificación del cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao L.*)

3.1.1. Locales comerciales con disponibilidad de almendras de cacao

En la figura 1, se muestra la distribución geográfica de los locales comerciales, donde se recopilaban las muestras de compra y venta de almendras de cacao para este estudio. Asimismo, se indica la ubicación del cultivo de cacao de donde se obtuvieron las muestras testigo. Cabe recalcar que los cuatro puntos que representan los locales comerciales se encuentran dentro del área urbana del cantón Quinindé, mientras que el cultivo de cacao está situado en la zona rural del cantón, específicamente a lo largo de la vía San Ramón.

Figura 1

Mapa de ubicación de los puntos de recolección de muestras de almendras de cacao en los respectivos locales comerciales seleccionados y muestra testigo



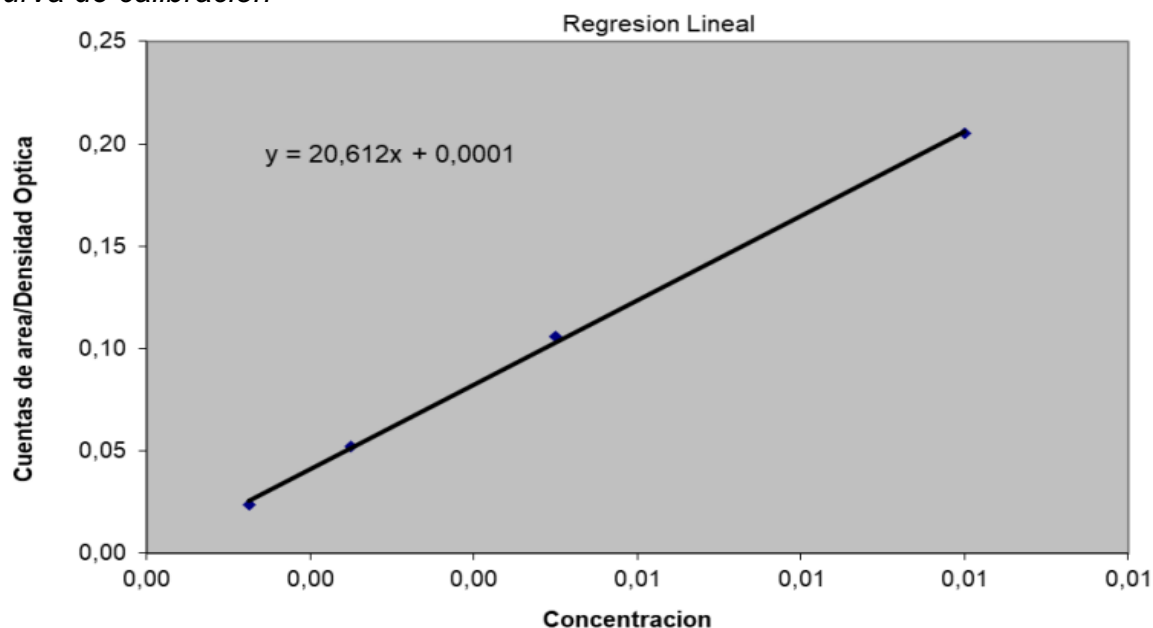
Nota: (Autores, 2026).

3.2. Curva de calibración

Para medir el cadmio, se utilizó una curva de calibración lineal, determinando cuantitativamente la absorbancia de cada solución patrón mediante el uso de un espectrofotómetro de absorción atómica, realizando las mediciones por duplicado para garantizar la reproducibilidad de los datos obtenidos; con la ecuación $y = 20,612x + 0,0001$, mostrando un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9997. En donde R^2 mide qué tan bien los puntos experimentales se ajustan a la línea de calibración, variando entre 0 y 1, en la cual un R^2 cercano a 1 lo cual indica que la curva es muy buena, es decir, los datos experimentales se ajustan casi perfectamente a la línea recta, y en caso de que R^2 es muy bajo (por ejemplo, 0.8 o menos), significa que la dispersión de los datos es alta y la calibración no es confiable.

El método analítico aplicado presentó un límite de detección de 0,00050 mg/kg y un límite de cuantificación de 0,00125 mg/kg, lo que evidencia su elevada sensibilidad para determinar cadmio en niveles traza. La calibración mostró una correlación lineal sólida entre la señal de absorbancia y las concentraciones conocidas del analito, lo cual permite interpolar con precisión los valores desconocidos en las muestras evaluadas. Esta linealidad no solo garantiza la exactitud de los resultados, sino que también respalda la confiabilidad del procedimiento. Una curva de calibración bien establecida y validada verifica el adecuado desempeño del equipo y contribuye a la trazabilidad y reproducibilidad del análisis, aspectos esenciales para asegurar la calidad de los datos generados.

Figura 2
Curva de calibración



Nota: (Autores, 2026).

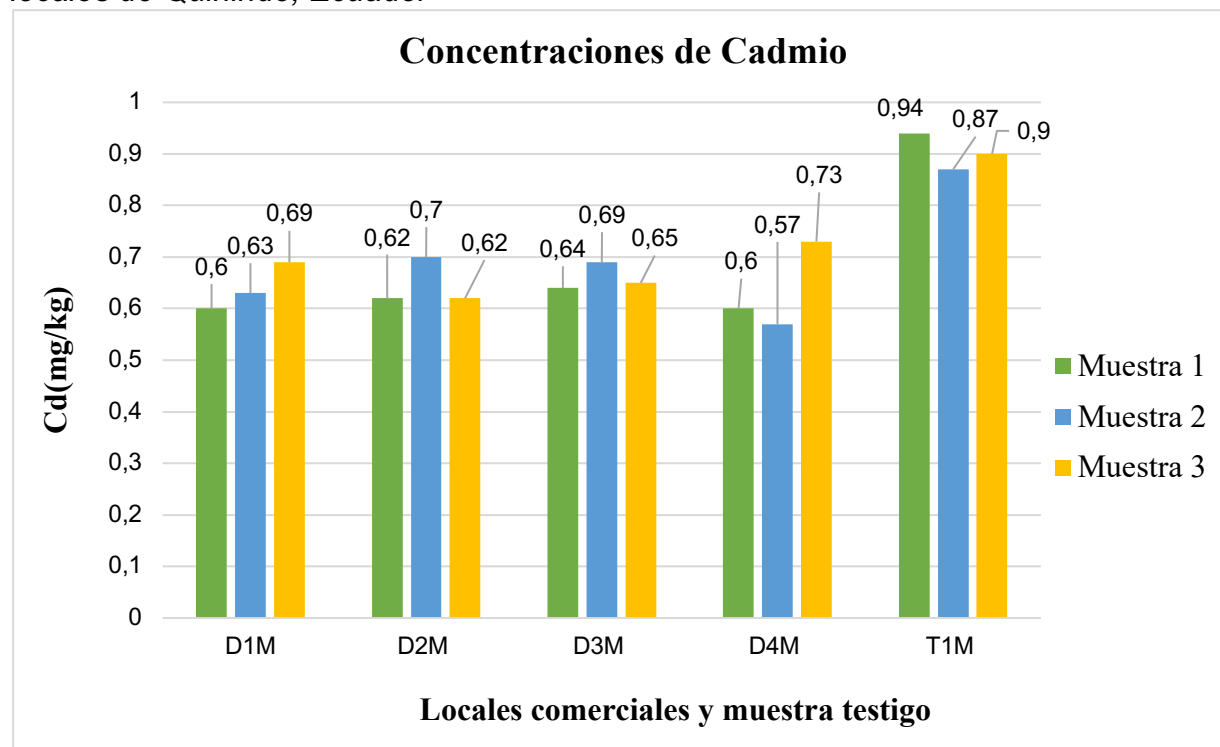
3.3. Concentraciones de cadmio por locales comerciales

En la figura 3 se presentan las concentraciones de cadmio (Cd) en almendras de cacao comercializadas en distintos locales del cantón Quinindé, todas con un porcentaje de humedad entre 55 y 60 %. Las barras de color verde corresponden al primer muestreo, las de color celeste al segundo y las de color amarillo al tercer muestreo. Es importante señalar que la abreviatura "DM" hace referencia a "Distribuidora Muestra", con los números 1, 2, 3 y 4, indicando el orden de la toma de muestras.

Dentro de esta investigación, a partir del análisis realizado mediante espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, se obtuvieron las siguientes concentraciones de cadmio: $0,64 \pm 0,05$ mg/kg (DIM), $0,65 \pm 0,05$ mg/kg (D2M), $0,66 \pm 0,03$ mg/kg (D3M), $0,63 \pm 0,09$ mg/kg (D4M) y $0,90 \pm 0,04$ mg/kg (TIM). Se observa que la mayor concentración de cadmio se registró en la muestra testigo (TIM) con $0,90 \pm 0,04$ mg/kg, mientras que la menor concentración se detectó en la muestra D4M, con $0,63 \pm 0,09$ mg/kg.

Figura 3

Concentraciones de Cd (mg/kg) en almendras de cacao comercializadas en los locales de Quinindé, Ecuador



Nota: (Autores, 2026).

La detección de cadmio (Cd) en almendras de cacao cultivadas en el cantón Quinindé, ubicado en la provincia de Esmeraldas, responde a la influencia de múltiples factores relacionados con las condiciones edáficas, prácticas agrícolas y el manejo postcosecha. Investigaciones previas han evidenciado niveles de cadmio superiores a los valores establecidos por la normativa vigente, lo cual representa una limitante para la calidad e inserción del producto en mercados internacionales (Acosta y Pozo, 2013). Entre los factores determinantes, destaca la composición del suelo, ya que parámetros como el pH, la textura y el contenido de materia orgánica condicionan la disponibilidad y movilidad del cadmio, facilitando su absorción por las raíces del cultivo (López-Ulloa et al., 2021).

Desde el enfoque edáfico, los suelos del cantón Quinindé exhiben propiedades que pueden facilitar la movilidad del cadmio, particularmente en zonas donde la materia orgánica es escasa y el pH tiende a ser ácido. Estas condiciones favorecen la solubilidad y disponibilidad del metal, incrementando su absorción por las raíces del cacao (López-Ulloa et al., 2021). Asimismo, la concentración natural de cadmio en los suelos podría estar relacionada con la litología local, lo cual explicaría las variaciones registradas entre diferentes puntos de muestreo dentro de la misma región.

En el ámbito del manejo agrícola, el uso de fertilizantes fosfatados representa una fuente potencial de incorporación de cadmio (Cd) al suelo, debido a que este metal suele encontrarse como impureza en dichos insumos minerales (Bonomelli et al., 2003). La aplicación prolongada de estos fertilizantes puede incrementar la

concentración de cadmio biodisponible, facilitando su absorción por los cultivos y, por ende, su ingreso a la cadena alimentaria. Este proceso se ve agravado por prácticas agrícolas intensivas y por el uso de determinadas variedades de cacao que presentan una mayor eficiencia en la captación de metales pesados, lo cual incide directamente en los niveles detectados en las almendras cosechadas.

Por otro lado, el procesamiento postcosecha también juega un papel importante en la concentración final de cadmio en el cacao de Quinindé, como: la fermentación, el secado y el almacenamiento, los cuales pueden estar sujetos a fuentes de contaminación secundaria, como el uso de agua contaminada o contacto con superficies metálicas (Acosta y Pozo, 2013).

Además, la variabilidad en los niveles de cadmio observada en las muestras comerciales sugiere que el origen del cacao comercializado en los distintos locales de Quinindé no es homogéneo, es decir, las almendras pueden provenir de diferentes fincas con condiciones edafológicas y prácticas agrícolas distintas (Fuentes, 2023).

La elevada concentración de cadmio detectada en la muestra testigo sugiere su origen en un área con mayor carga edáfica de este metal o en condiciones agronómicas que favorecen su absorción por el cultivo. Por el contrario, las muestras que presentan niveles más bajos podrían provenir de parcelas con menor contaminación en el suelo o de sistemas productivos donde se han implementado prácticas de manejo orientadas a reducir la biodisponibilidad del cadmio, como la aplicación de enmiendas orgánicas o ajustes en el pH del suelo.

La presencia de cadmio en las almendras de cacao del cantón Quinindé responde a la combinación de factores relacionados con la geología del suelo, las prácticas agrícolas empleadas y el manejo durante el procesamiento postcosecha. Aunque la acumulación de cadmio está mayormente vinculada a etapas previas a la cosecha, como la naturaleza del suelo y la aplicación de fertilizantes, es fundamental reconocer que los procesos posteriores, incluyendo el transporte y almacenamiento, también pueden contribuir a la contaminación del producto final.

Durante el transporte, las almendras de cacao pueden entrar en contacto con fuentes externas de cadmio presentes tanto en el ambiente como en los materiales empleados para su traslado. El contacto directo con superficies contaminadas o la utilización de envases que contienen cadmio pueden aumentar la concentración de este metal en el producto. Para minimizar este riesgo, se recomienda el uso de sacos de plástico o yute colocados sobre pallets de madera, evitando así el contacto directo del cacao con superficies susceptibles de contaminación (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2024).

Comparación de los niveles de cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) comercializadas en el cantón Quinindé, con las normas nacionales e internacionales

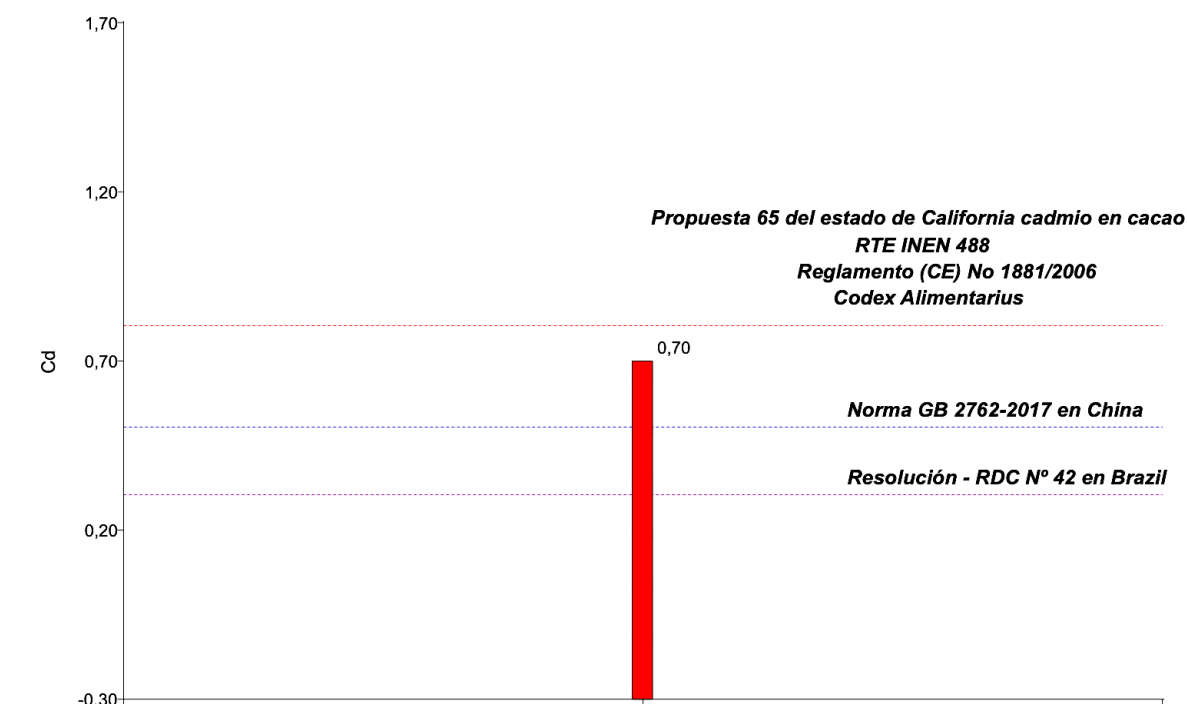
La figura 4, muestra la concentración promedio de cadmio en las almendras de cacao comercializadas en los locales de Quinindé, la cual alcanza los 0,70 mg/kg, que es aproximadamente 1,09 veces menor que el promedio de los límites cercanos a 0,76 mg/kg que corresponde a RTE INEN 488, Reglamento (CE) No 1881/2006 (Unión Europea), Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao y el Codex Alimentarius.

No obstante, este valor excede considerablemente los límites permitidos por dos normativas internacionales: 0,5 mg/kg según la Resolución RDC N° 42 de Brasil y 0,3 mg/kg conforme a la Norma GB 2762-2017 de China. En concreto, supera en aproximadamente 1,4 veces el límite brasileño y en 2,33 veces el establecido por la regulación china.

La elevada concentración de cadmio en las muestras analizadas no solo indica una posible contaminación del cacao, sino que también constituye un riesgo significativo para la salud pública. La exposición continua a niveles elevados de este metal pesado aumenta la probabilidad de efectos adversos en los consumidores. Asimismo, al superar con claridad los límites establecidos por las normativas de Brasil y China, el cacao proveniente de Quinindé podría enfrentar restricciones comerciales en dichos mercados, lo que afectaría su acceso y competitividad a nivel internacional.

Figura 4

Concentración media de cadmio en almendras de cacao comercializados en el cantón Quinindé comparadas con normativas



Nota: (Autores, 2026).

Locales comerciales y muestras testigo

Impacto ambiental generado por las almendras de cacao contaminadas por cadmio en el cantón Quinindé, Ecuador

Impacto ambiental generado por las almendras de cacao contaminadas por cadmio en el cantón Quinindé, Ecuador a través de la normativa (RTE INEN 488, Reglamento (CE) No 1881/2006 (Unión Europea), Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao, Codex Alimentarius)

En la tabla 1 se muestra la evaluación cuantitativa del impacto ambiental de las concentraciones de cadmio (Cd) en almendras de cacao comercializadas en el cantón Quinindé, la cual se realizó utilizando la ecuación propuesta por Arada et al. (2017), donde el impacto ambiental se calculó con la diferencia entre el valor del parámetro obtenido en las muestras analizadas (P_A) y el valor máximo permitido establecido en las normativas de referencia (P_{NC}), en este caso con los valores de las normas de la RTE INEN 488, Reglamento (CE) No 1881/2006 (Unión Europea), Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao, Codex Alimentarius (0,8).

Dentro de la tabla se observa que, la mayoría de las muestras comerciales (D1M, D2M, D3M y D4M) presentan valores negativos de impacto ambiental, lo que evidencia que sus concentraciones de cadmio están por debajo de los límites establecidos. No obstante, la muestra T1M muestra un valor positivo (+0,1), lo cual, de acuerdo con la metodología aplicada, implica la existencia de un daño ambiental relevante. Esto sugiere que, en esta ubicación específica, la concentración de cadmio ha alcanzado niveles preocupantes, representando un riesgo tanto para el ambiente como para la seguridad alimentaria.

Tabla 1
Impacto ambiental del cadmio cuantificado mediante la RTE INEN 488, Reglamento (CE) No 1881/2006 (Unión Europea), Propuesta 65 del estado de California cadmio en cacao, Codex Alimentarius

Elem	$P_A \text{ (mg/kg)}^{-1}$					P_{NC} (mg/kg) ⁻¹ 0,8	Impacto ambiental				
	D1M	D2M	D3M	D4M	T1M		D1M	D2M	D3M	D4M	T1M
Cd	0,64	0,65	0,66	0,63	0,90		-0,16	-0,15	-0,14	-0,17	0,1

Nota: El impacto ambiental se muestra en valores negativos y positivos. En la evaluación, P_A representa las concentraciones de cadmio encontradas y P_{NC} corresponde al valor del parámetro según las normativas (Autores, 2026).

3.4. Análisis estadístico

La figura 1 ilustra el impacto ambiental relacionado con la presencia de cadmio en almendras de cacao comercializadas en el cantón Quinindé. Para determinar la distribución de los datos, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks, arrojando un valor de significancia de $p = 0,007$, lo que indica que los datos no se ajustan a una distribución normal ($p < 0,05$). Ante esta situación, se decidió utilizar la

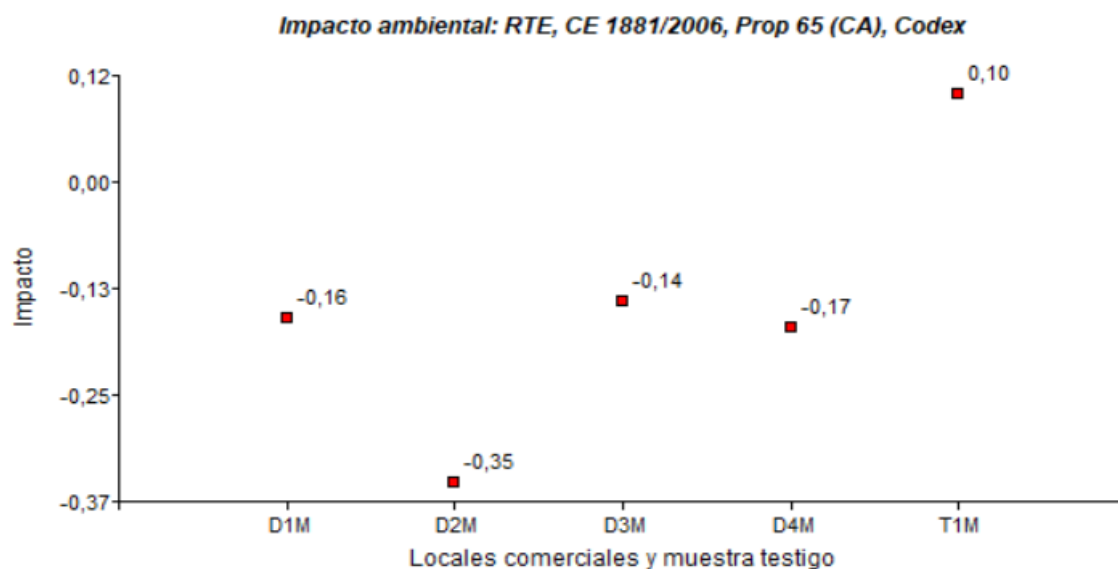
prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, adecuada para comparar múltiples grupos cuando no se cumple el supuesto de normalidad.

La aplicación del análisis estadístico de Kruskal-Wallis permitió identificar posibles diferencias en las concentraciones de cadmio, tomando como referencia los límites establecidos por regulaciones internacionales como la Normativa Técnica RTE INEN 488, el Reglamento (CE) N.º 1881/2006 de la Unión Europea, la Propuesta 65 del Estado de California y el Codex Alimentarius. Sin embargo, los resultados obtenidos no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados ($H = 7,48$; $p = 0,1110$), al no cumplirse el criterio de significancia ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos indican que, conforme a los límites establecidos por las normativas internacionales incluyendo la RTE INEN 488, el Reglamento (CE) N.º 1881/2006 de la Unión Europea, la Propuesta 65 del Estado de California y el Codex Alimentarius, las concentraciones de cadmio en las almendras de cacao analizadas no presentan diferencias significativas entre los distintos puntos de venta evaluados. Esta uniformidad sugiere que el riesgo ambiental y el potencial impacto en la seguridad alimentaria se mantienen constantes en el cantón Quinindé, sin evidenciar focos críticos de contaminación.

Figura 5

Impacto ambiental en Quinindé, cuantificado con base en los límites máximos permisibles de cadmio en cacao establecidos por las principales normativas internacionales



Nota: El impacto ambiental se representa en el eje Y del plano cartesiano, ubicado en la parte inferior (negativa) (Autores, 2026).

Impacto ambiental generado por las almendras de cacao contaminadas por cadmio en el cantón Quinindé, Ecuador a través de la normativa (La Resolución RDC N° 42 de Brasil)

La tabla 2 presenta el resumen de la evaluación cuantitativa del impacto ambiental generado por las concentraciones de cadmio (Cd) en almendras de cacao comercializadas en el cantón Quinindé. Esta evaluación se basó en los resultados obtenidos de muestras recolectadas en establecimientos de los locales comerciales, así como de una muestra de control (testigo), aplicando la ecuación propuesta por Arada et al. (2017), la cual calcula el impacto ambiental como la diferencia entre el valor del cadmio encontrado en las muestras (P_A) y el límite máximo permisible (P_{NC}), el cual, para este análisis, corresponde a 0,5 según lo establecido en la Resolución RDC N° 42 de Brasil.

La interpretación de los valores obtenidos se realiza considerando que un resultado positivo (+) indica la existencia de un daño ambiental considerable, reflejando concentraciones que exceden los niveles permitidos, mientras que un resultado negativo (–) señala la ausencia de afectación severa. En el presente estudio, todas las muestras analizadas mostraron valores positivos a escala en unidades de mg/kg, confirmando que las concentraciones de cadmio sobrepasan los límites normativos.

Los valores del índice de impacto ambiental oscilan entre 0,13 y 0,40, siendo este último el más alto registrado en las muestras analizadas. A pesar de las diferencias entre los puntos de muestreo, todos los resultados superan el umbral que define un daño ambiental severo, lo que evidencia una situación de contaminación por cadmio extendida en la zona de estudio. Particularmente, el valor de 0,40 requiere especial atención, ya que podría estar asociado a factores como la presencia de suelos previamente contaminados, el uso intensivo de agroquímicos o la proximidad a fuentes de origen industrial o minero, condiciones que agravan el riesgo ecológico y afectan directamente la seguridad alimentaria en el cantón Quinindé.

Tabla 2

Impacto ambiental del cadmio cuantificado mediante la Resolución RDC N° 42 de Brasil

Elem	P_A (mg/kg) ⁻¹					P_{NC}	Impacto ambiental				
	DIM	D2M	D3M	D4M	T1M	(mg/kg) ⁻¹ 0,5	D1M	D2M	D3M	D4M	T1M
Cd	0,64	0,65	0,66	0,63	0,90		0,14	0,15	0,16	0,13	0,40

Nota: El impacto ambiental se muestra en valores negativos. En la evaluación, P_A representa las concentraciones de cadmio encontradas y P_{NC} corresponde al valor del parámetro según las normativas (Autores, 2026).

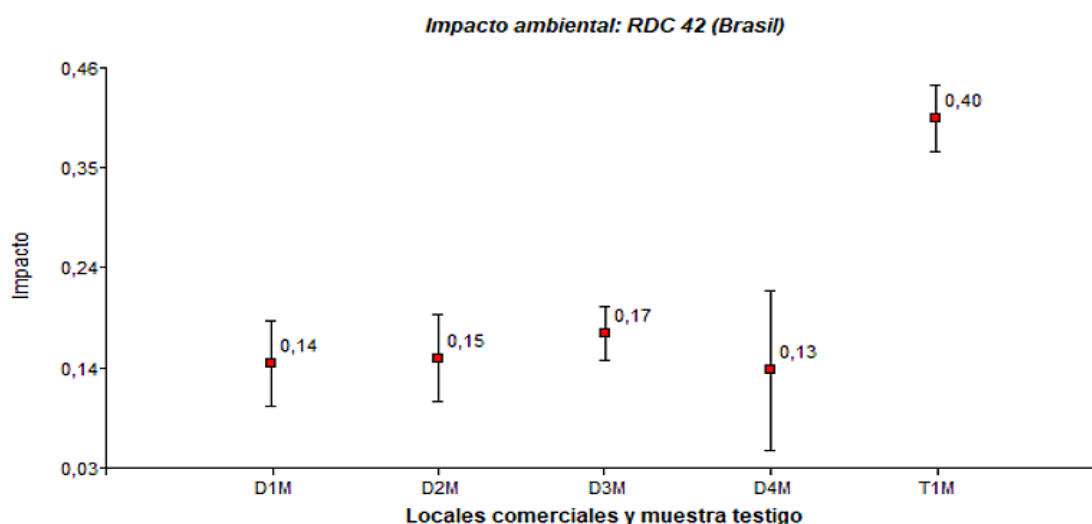
Análisis estadístico

La Figura 5 muestra el análisis del impacto ambiental asociado a las concentraciones de cadmio en almendras de cacao recolectadas en diferentes establecimientos agrícolas del cantón Quinindé. Para determinar la distribución de los datos, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks, la cual arrojó un valor de significancia de $p = 0,0089$. Al ser este valor inferior al nivel crítico de 0,05, se concluye que los datos no se ajustan a una distribución normal, por lo que fue necesario recurrir a técnicas estadísticas no paramétricas para su análisis.

En función de la distribución no normal de los datos, se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar las concentraciones de cadmio entre los distintos puntos de muestreo. El análisis arrojó un valor de $H = 7,59$ con una significancia de $p = 0,1043$, lo que indica la inexistencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados ($p > 0,05$). Estos resultados sugieren una distribución homogénea del cadmio en las muestras analizadas, y al ser contrastados con los límites establecidos por la Resolución RDC N° 42 de Brasil, se concluye que, en las condiciones evaluadas, no se evidencian variaciones que representen un riesgo adicional para la seguridad alimentaria ni para el entorno ambiental del cantón Quinindé.

Figura 6

Impacto ambiental en Quinindé cuantificado mediante los límites máximos permitidos (Resolución RDC N° 42 de Brasil)



Nota: (Autores, 2026).

Impacto ambiental generado por las almendras de cacao contaminadas por cadmio en el cantón Quinindé, Ecuador a través de la normativa (La Norma GB 2762-2017 de China)

En la tabla 3 se expone la evaluación cuantitativa del impacto ambiental utilizando la ecuación propuesta por Arada et al. (2017), la cual establece mediante la diferencia entre el valor del parámetro determinado en las muestras (P_A) y el valor máximo permisible establecido en las normativas de referencia (P_{NC}), en este caso la Norma GB 2762-2017 de China (0,3), el impacto ambiental que se genera. Este valor de impacto ambiental se interpreta bajo una escala en unidades de mg/kg, en donde los resultados positivos (+) reflejan un daño ambiental considerable, evidenciando concentraciones de cadmio superiores al límite permitido, mientras que valores negativos (–) indicarían la ausencia de un impacto severo.

Según los resultados expuestos en la tabla 15, los índices de impacto ambiental varían entre 0,33 y 0,60, evidenciando una tendencia al incremento en las concentraciones de cadmio entre las distintas muestras analizadas. El valor más elevado (0,60) podría

corresponder a un sitio con presencia puntual de contaminación, posiblemente asociado a una fuente específica de emisión. Aunque las diferencias entre las demás muestras no son tan pronunciadas, todas superan el umbral que define un daño ambiental severo, lo que refuerza la hipótesis de una contaminación por cadmio generalizada en los cultivos de cacao del área de estudio.

Considerando que el cadmio es un metal pesado de alta toxicidad, su presencia en concentraciones elevadas representa una amenaza tanto para el medio ambiente como para la salud humana, debido a su capacidad de acumularse en los suelos agrícolas y en los productos cultivados, comprometiendo así la calidad del cacao y la seguridad alimentaria de la población.

Tabla 3
Impacto ambiental del cadmio cuantificado mediante la Norma GB 2762-2017 de China

Elem	P _A (mg/kg) ⁻¹					P _{Nc} (mg/kg) ⁻¹ 0,3	Impacto ambiental				
	D1M	D2M	D3M	D4M	T1M		D1M	D2M	D3M	D4M	T1M
Cd	0,64	0,65	0,66	0,63	0,90		0,34	0,35	0,36	0,33	0,60

Nota: (Autores, 2026).

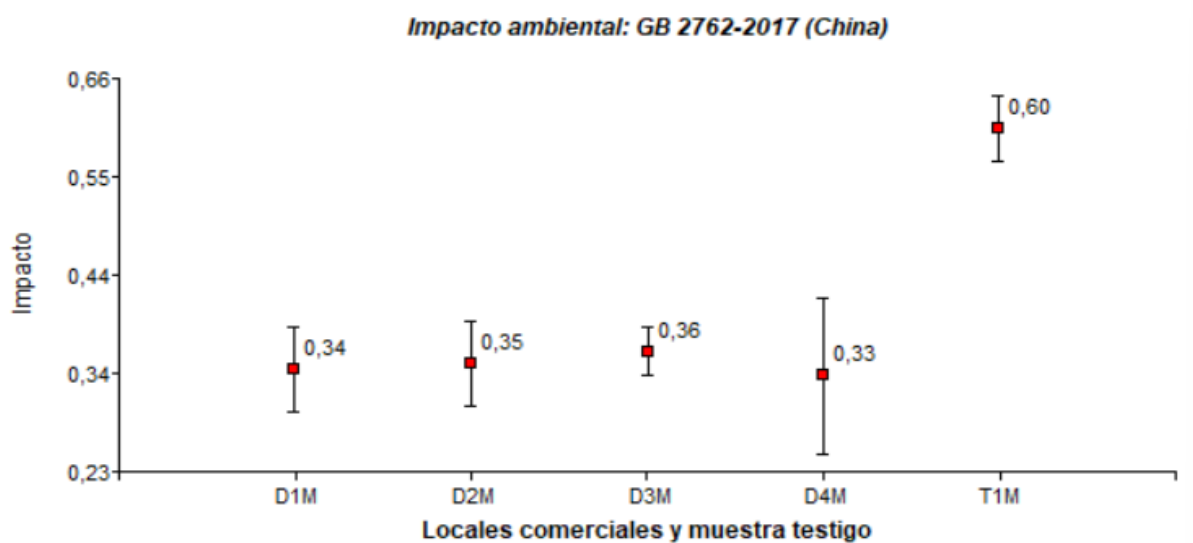
3.5. Análisis estadístico

La figura 6 ilustra el análisis del impacto ambiental asociado a la concentración de cadmio en almendras de cacao procedentes del cantón Quinindé. Para determinar la distribución de los datos, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks, obteniéndose un valor de significancia de $p = 0,0077$ ($p < 0,05$). Este resultado, inferior a 0,05, indica que los datos no presentan una distribución normal, razón por la cual se optó por emplear la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, adecuada para comparar medianas entre más de dos grupos cuando no se cumple el supuesto de normalidad.

El análisis mediante Kruskal-Wallis arrojó un estadístico de prueba de $H = 7,48$ con un valor de $p = 0,1110$ ($p < 0,05$), evidenciando la ausencia de diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de cadmio entre los grupos evaluados. Estos resultados fueron interpretados conforme a los límites establecidos en la Normativa GB 2762-2017 de China para contaminantes en alimentos, concluyéndose que, bajo las condiciones analizadas, las concentraciones de cadmio no presentan variaciones relevantes que afecten la seguridad alimentaria ni el impacto ambiental en el área de estudio.

Figura 7

Impacto ambiental en Quinindé cuantificado mediante los límites máximos permitidos (Norma GB 2762-2017 de China)



Nota: (Autores, 2026).

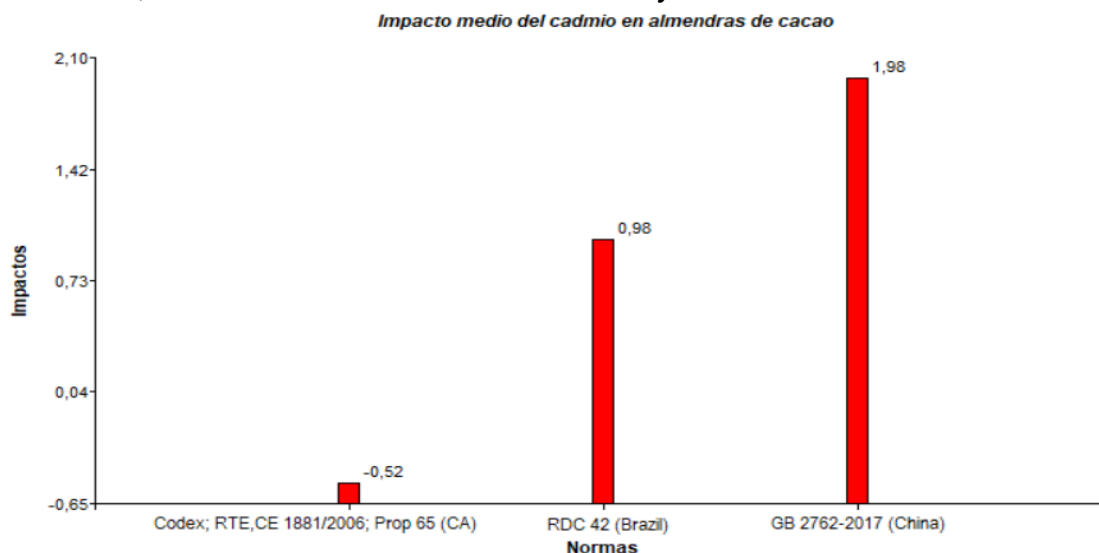
3.6. Impacto ambiental medio del cadmio en almendras de cacao comercializadas en el cantón Quinindé

La figura 7 muestra la evaluación del impacto ambiental promedio de las concentraciones de cadmio en almendras de cacao, comparadas con diferentes normativas nacionales e internacionales. El impacto ambiental se calculó utilizando la ecuación propuesta por Arada et al. (2017), la comparación se establece entre el valor del parámetro obtenido en las muestras analizadas (P_A) y el valor máximo permitido según las normativas de referencia (P_{NC}). El resultado, expresado en mg/kg, permite identificar el nivel de afectación ambiental: valores positivos (+) indican que la concentración de cadmio excede el límite normativo, lo que representa una condición crítica de contaminación; mientras que valores negativos (–) reflejan niveles por debajo del umbral permitido, sin implicar un riesgo ambiental significativo.

En este escenario, los resultados obtenidos indican que, conforme a los límites establecidos por el Codex Alimentarius, la Norma Técnica Ecuatoriana RTE INEN 488, el Reglamento (CE) N.º 1881/2006 y la Propuesta 65 del Estado de California, se registra un valor de impacto ambiental de -0,52 mg/kg. Este resultado refleja que las concentraciones de cadmio en las muestras analizadas se mantienen por debajo de los umbrales permitidos, sin representar un riesgo ambiental según dichas normativas. No obstante, al ser contrastados con la Resolución RDC N.º 42 de Brasil, se observa un valor positivo de 0,98 mg/kg, lo que indica que los niveles de cadmio superan los límites establecidos por esa regulación, implicando un riesgo ambiental de carácter moderado. Finalmente, según la regulación china GB 2762-2017, se registra el mayor impacto positivo, con un valor de 1,98 mg/kg, reflejando una contaminación significativa y un riesgo ambiental elevado en relación con sus estándares.

Figura 7

Impacto ambiental promedio en Quevedo evaluado según las normativas nacionales e internacionales vigentes, incluyendo la RTE INEN 488, el Reglamento (CE) N.º 1881/2006 de la Unión Europea, la Propuesta 65 del Estado de California, el Codex Alimentarius, la Resolución RDC N° 42 de Brasil y la Norma GB 2762-2017 de China



Nota: (Autores, 2026).

Los resultados obtenidos permiten una evaluación precisa y cuantificable del grado de contaminación por cadmio en almendras de cacao, proporcionando una base técnica sólida para la toma de decisiones orientadas a la mitigación de riesgos e implementación de medidas correctivas. La variabilidad observada en los valores de impacto refleja las diferencias entre los límites establecidos por cada normativa, evidenciándose una mayor rigurosidad en ciertos marcos regulatorios, como el chino. Esto representa un desafío para los productores locales, quienes deben adecuar sus procesos a estándares internacionales más exigentes, lo cual no solo condiciona el acceso a mercados externos, sino que también demanda inversiones en tecnologías limpias y prácticas agrícolas sostenibles (Herrera-Sánchez & Gavilánez-Buñay, 2023).

Por otro lado, de igual manera el impacto ambiental generado por cadmio permite comprender cómo la categorización del riesgo varía en función de la normativa aplicada, mientras que en ciertos estándares internacionales los niveles de cadmio presentes en las almendras de cacao podrían ser aceptables, en otros mercados se considerarían inadecuados, lo que podría restringir su comercialización. En este contexto, se vuelve crucial implementar estrategias de mitigación de riesgos y técnicas de remoción de cadmio en la producción de cacao, especialmente para cumplir con las normativas más exigentes, como las de China.

Además, los resultados resaltan la necesidad de adoptar medidas correctivas en los cultivos de cacao, enfocándose en una gestión ambiental más eficiente para reducir la absorción de cadmio por las plantas, contando con información clara y precisa sobre el impacto del cadmio en diferentes mercados internacionales facilita la toma de decisiones para garantizar la calidad del producto y su viabilidad comercial; al igual

que, el monitoreo continuo de la presencia de metales pesados en alimentos y el desarrollo de estrategias de remediación contribuirán a asegurar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la producción cacaotera.

4. Discusión

El estudio analiza las concentraciones de cadmio en almendras de cacao comercializadas en Quinindé y muestra un promedio de 0,70 mg/kg, con valores comerciales relativamente próximos entre 0,63 y 0,66 mg/kg, mientras la muestra testigo alcanza 0,90 mg/kg; sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis no evidencia diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados ($H = 7,48$; $p = 0,1110$). Este comportamiento sugiere que la presencia del metal no se restringe claramente a un establecimiento comercial específico, aunque la mayor concentración observada en la muestra testigo podría reflejar condiciones particulares del área de cultivo. Los hallazgos convergen con Acosta y Pozo (2013) y Barragán et al. (2022), quienes documentan la presencia de cadmio en almendras de cacao en contextos productivos ecuatorianos, y son coherentes con la influencia atribuida al pH, la materia orgánica y otras propiedades edáficas sobre la movilidad del metal (López-Ulloa et al., 2021). Del mismo modo, la posible incidencia de fertilizantes fosfatados señalada por Bonomelli et al. (2003) ofrece una explicación plausible para las concentraciones detectadas, aunque estos factores no se miden directamente y, por tanto, no permiten establecer relaciones causales.

La interpretación de estos resultados adquiere mayor relevancia al considerar que una misma concentración recibe valoraciones diferentes según el marco regulatorio aplicado: el manuscrito reporta un impacto agregado de $-0,52$ bajo los referentes menos restrictivos, frente a $0,98$ con el criterio brasileño y $1,98$ con el estándar chino, lo que evidencia que la aceptabilidad comercial y ambiental del cacao depende sustancialmente del mercado de destino. Esta situación coincide con Perea et al., (2022), quienes advierten repercusiones del control de cadmio sobre la cadena de valor del cacao ecuatoriano, y respalda la necesidad de fortalecer la trazabilidad y las prácticas preventivas recomendadas para el cultivo (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2024). No obstante, los hallazgos deben interpretarse con cautela debido al número limitado de establecimientos y de muestras, al periodo trimestral de observación y a la ausencia de mediciones simultáneas de suelo, agua, fertilización y condiciones postcosecha. Futuras investigaciones deberían ampliar la cobertura temporal y espacial e integrar análisis pareados suelo–almendra para relacionar propiedades edáficas, prácticas agrícolas y concentración de cadmio. En este sentido, el aporte central consiste en generar evidencia localizada para Quinindé que articula cuantificación analítica, comparación entre puntos de comercialización y evaluación multinormativa, atendiendo la brecha de información territorial planteada para la gestión de la inocuidad y competitividad del cacao ecuatoriano (Perea et al., 2022; Acosta y Pozo, 2013).

5. Conclusiones

C La concentración promedio de cadmio en las almendras de cacao comercializadas en el cantón Quinindé fue de 0,70 mg/kg, con valores que oscilaron entre 0,63 y 0,66 mg/kg, superando los límites establecidos por normativas de países como Brasil (0,5 mg/kg) y China (0,3 mg/kg). El tratamiento identificado como T1M presentó la concentración más elevada, alcanzando 0,90 mg/kg, posiblemente asociada a condiciones edáficas específicas o a prácticas agrícolas intensivas. Asimismo, se observó una variación mensual en los niveles de cadmio, con un incremento notable en diciembre (0,72 mg/kg), lo que evidencia la necesidad de implementar un sistema de monitoreo continuo que permita controlar este contaminante en las distintas etapas del proceso productivo.

Las elevadas concentraciones de cadmio inciden directamente en la competitividad del cacao ecuatoriano en mercados internacionales, especialmente aquellos con normativas estrictas. Aunque los niveles detectados se aproximan a los límites establecidos por el Codex Alimentarius y el Reglamento (CE) N.º 1881/2006, el incumplimiento en mercados clave genera restricciones comerciales significativas. En términos ambientales, el impacto varía según la normativa aplicada: es mínimo bajo los criterios del Codex (-0,52), moderado conforme a la regulación brasileña (0,98) y considerable según la norma china (1,98), lo que subraya la urgencia de implementar estrategias efectivas de mitigación.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, S. y Pozo, P. (2013). Determinación de cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao*) de cinco fincas ubicadas en la vía Santo Domingo-Esmeraldas, mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. *infoANALÍTICA*, 1(1), 69–82. <https://infoanalitica-puce.edu.ec/index.php/infoanalitica/article/view/43>
- Arada Pérez, M. de los Á., Garrido Larramendi, D., & Acebal Ibarra, A. T. (2018). Evaluación de metales pesados e impacto ambiental en los pozos “Rive Fuente” y “Bárbara” del poblado El Cobre. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 68–76. https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000100006
- Araujo-Abad, L. S., Tapia, W. y Villamarín-Ortiz, A. (2020). Verificación del método analítico de espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito para la cuantificación de cadmio en almendra de cacao (*Theobroma cacao*). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 47–55. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.04>

- Barragán Monrroy, R. J., Bravo Sánchez, L. R. y Torres Puentes, J. C. (2022). Cuantificación de cadmio y plomo en granos de soja (*Glycine max*) comercializados en el cantón Quevedo, Ecuador. *Revista Bases de la Ciencia*, 7(Especial), 37–50. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4242>
- Bonomelli, C., Bonilla, C. y Valenzuela, A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(10), 1179–1186. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001000007>
- Codex Alimentarius Commission. (2019). *General standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations; World Health Organization. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/1_CXS_193e.pdf
- Fuentes Quijandria, F. G. (2023). *Impacto ambiental de los fertilizantes fosfatados en el nivel de contaminación por cadmio en suelos cultivados en el valle de Ica* [Tesis doctoral, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. <https://hdl.handle.net/20.500.13028/4221>
- Herrera-Sánchez, D. J., & Gavilánez-Buñay, T. C. (2023). Estrategias de agricultura regenerativa para mejorar la salud del suelo. *Revista Científica Ciencia y Método*, 1(2), 15–28. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v1/n2/12>
- Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S. y Pampa-Quispe, N. B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: Una revisión. *Información Tecnológica*, 31(4), 139–152. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- International Organization for Standardization. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017)*. <https://www.iso.org/standard/66912.html>
- López-Ulloa, M., Jaimez, R. y 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 (1.ª ed.)*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia_1.pdf
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2024). *Prácticas agrícolas para reducir la contaminación de cadmio en cacao*. <https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/03/4.-PracticasAgricolas-Reduced.pdf>
- Perea, C., Vélez, A. F., Castro, F., Bunn, C., Vázquez Decastro, J. L., Santos, A., Chávez, E. y Charry, A. (2022). *Impactos en la cadena de valor del cacao en Ecuador como consecuencia del Reglamento (UE) No. 488/2014* (Publicación CIAT No. 536). Centro Internacional de Agricultura Tropical. <https://hdl.handle.net/10568/125722>
- Prado-Chinga, A. E. (2022). Análisis comparativo del desempeño laboral en empresas de compra y venta de cacao en Quinindé: un enfoque en las PYMES. *Journal*

- of Economic and Social Science Research*, 2(2), 57–69. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v2/n2/52>
- Rajeswari, N., & Priyadharshini, V. P. (2021). Evaluation of nutritional and nutraceutical content of polished and unpolished barnyard millet: An analytical study. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 9(3), 1067–1073. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.9.3.31>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2019, 28 de junio). *Material de referencia de cadmio en cacao en proceso de certificación por el INEN*. <https://www.normalizacion.gob.ec/material-de-referencia-de-cadmio-en-cacao-en-proceso-de-certificacion-por-el-inen/>
- Torres-Cobo, L. E., & Muñoz-Tarira, A. J. (2026). Optimización del flujo operativo como estrategia para garantizar la inocuidad en la recepción de cacao. *Revista Científica Zambos*, 5(1), 138–153. <https://doi.org/10.69484/rcz/v5/n1/157>
- Toscano-Quispe, S. Y., Villalva-Salguero, T. F., Abad-Basantes, C. A., & Sarango-Romero, V. J. (2026). Fallos en la trazabilidad digital de la cadena de suministro y su impacto en el control de calidad. *Journal of Economic and Social Science Research*, 6(2), 45–56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v6/n2/239>
- U.S. Environmental Protection Agency. (1996). *Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils* (Revision 2). <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/9789210024938>