



Efecto del calcio y la materia orgánica como alternativa de reducción en la toxicidad de cadmio en maíz

Effect of calcium and organic matter as an alternative for reducing cadmium toxicity in maize

Autores

¹Ana Karen Cobeña Loor 

 cobena-ana8952@unesum.edu.ec

²Jéssica Jessenia Morán Morán 

 jessica.moran@unesum.edu.ec

¹Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Instituto de Posgrado. Programa de Maestría en Gestión Ambiental. Jipijapa, Manabí, Ecuador

²Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura. Carrera Agropecuaria. Jipijapa, Manabí, Ecuador.

Resumen

La contaminación por cadmio (Cd) en maíz es crucial para garantizar la seguridad alimentaria, dado que este metal pesado puede acumularse en los granos y representar un riesgo significativo para la salud humana. El objetivo fue evaluar fuentes de calcio (Ca) y materia orgánica (MO) como alternativa de reducción en la absorción de cadmio en maíz. Se empleó un diseño completo al azar con un arreglo factorial de 2 x 4, donde se evaluaron diferentes tratamientos que combinaban la aplicación de MO y fuentes de Ca. La preparación del suelo incluyó la adición de compost en los tratamientos con MO. La contaminación con Cd se realizó adicionando cloruro de cadmio ($CdCl_2$), posteriormente, se aplicaron las fuentes de Ca mediante riego. Las semillas de maíz se sembraron en macetas con un riego constante para mantener la humedad a capacidad de campo. Durante un período de 60 días, se monitorearon y registraron diversas variables, incluyendo la biomasa seca y concentración de Cd en raíces y tallos. Los resultados mostraron diferencias altamente significativas en la biomasa seca foliar y de la raíz de las plantas de maíz expuestas a la contaminación por cadmio, tanto en los efectos simples como en la interacción entre la MO y la fuente de Ca. Se observó que la incorporación de un 2% de MO y nitrato de calcio $Ca(NO_3)_2$ tuvo un impacto significativo en la producción de biomasa y en la concentración de Cd en las plantas de maíz expuestas al contaminante, tanto de manera independiente como en conjunto.

Palabras clave: metal pesado, absorción de cadmio, biomasa seca.

Abstract

Cadmium (Cd) contamination in maize is crucial for ensuring food security, as this heavy metal can accumulate in the grains and pose a significant risk to human health. The objective of this research was to evaluate calcium (Ca) sources and organic matter (OM) as alternatives to reduce cadmium uptake in maize. A completely randomized design with a 2 x 4 factorial arrangement was used, where different treatments combining OM application and Ca sources were evaluated. Soil preparation included the addition of compost in the OM treatments. Cd contamination was induced by adding cadmium chloride ($CdCl_2$), followed by the application of Ca sources through irrigation. Maize seeds were planted in pots with consistent irrigation to maintain adequate moisture. Over a period of 60 days, various variables were monitored and recorded, including dry weight and Cd concentration in roots and stems. The results showed highly significant differences in the dry biomass of maize leaves and roots exposed to cadmium contamination, both in simple effects and in the interaction between OM and Ca sources. It was observed that the incorporation of 2% OM and calcium nitrate $Ca(NO_3)_2$ had a significant impact on biomass production and Cd concentration in maize plants exposed to the contaminant, both independently and in combination.

Keywords: heavy metal, cadmium uptake, dry biomass.



Introducción

Zea mays L., mejor conocido como maíz, es uno de los cultivos más reconocidos a nivel mundial, tanto por su producción como por su papel crucial en la seguridad alimentaria, así como para el consumo humano y animal. Su versatilidad y uso generalizado lo convierten en un componente dietético esencial en muchas partes del mundo (Rouf et al., 2016). Sin embargo, la presencia de metales pesados, particularmente cadmio (Cd), en el suelo representa una amenaza para la seguridad de la calidad de los cultivos, la salud humana y el equilibrio ambiental (Rashid et al., 2023).

El cadmio, conocido por su alta toxicidad, es una grave preocupación tanto para la salud humana como para los ecosistemas. A diferencia de otros elementos, el Cd no desempeña ningún papel biológico esencial en el ambiente, por lo que su presencia es solo un subproducto de actividades humanas como la minería, la industria y la agricultura intensiva (Hayat et al., 2019). Puede acumularse en los suelos y ser absorbido por las plantas, lo que, en última instancia, resulta en la contaminación de la cadena alimentaria y la exposición humana a través del consumo de alimentos contaminados (Angon et al., 2024). Esta contaminación plantea diversas problemáticas ambientales y de salud.

El contexto internacional, a medida que ha aumentado la conciencia sobre los riesgos asociados con la contaminación por Cd, varios países han impuesto regulaciones ambientales más estrictas para disminuir sus efectos. Según las regulaciones, la reducción de la exposición a metales pesados en los alimentos y el desarrollo de prácticas agrarias más sustentables son objetivos para proteger tanto el ambiente como la salud humana (Hembrom et al., 2020). Normativas que regulan los niveles de Cd permitidos en productos alimenticios han sido establecidas en este contexto, lo que ha hecho que se dé más atención a las prácticas agrarias que pueden influir en la acumulación de este metal en los cultivos.

A nivel nacional la contaminación por metales pesados se está convirtiendo en un problema cada vez más grave en los ecosistemas agrícolas, los metales pesados como el Cd se acumulan en la cadena alimentaria y pueden tener efectos perjudiciales sobre las funciones fisiológicas de los organismos vivos (Luo et al., 2019). Las actividades antropogénicas pueden elevar las concentraciones de Cd en los suelos y las aguas subterráneas, que son importantes para mantener un suministro saludable de alimentos y agua potable (Daripa et al., 2023).

Ante estos obstáculos, se requiere investigar opciones viables para disminuir el riesgo al que conlleva la absorción del Cd en

los cultivos agrícolas. Entre los posibles enfoques, el uso de enmiendas del suelo como Ca y MO se ha convertido en un enfoque prometedor. Cada nutriente es esencial para el crecimiento de las plantas, el Cd no solo compite con el Ca por las membranas de transporte de la raíz, ya que poseen propiedades físico-químicas similares, sino que también puede formar complejos insolubles en el suelo, disminuyendo su disponibilidad para las plantas (Hayat et al., 2019). Por otro lado, el material orgánico elaborado a partir de restos de plantas y animales puede mejorar la estructura del suelo y la capacidad de retención de nutrientes, reduciendo la cantidad de cadmio que absorben las plantas y, en ciertos casos, facilitando su movimiento hacia formas menos accesibles (Genchi et al., 2020).

Bajo estos antecedentes, el estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial del calcio y la materia orgánica como alternativa para disminuir la toxicidad del cadmio en el maíz, un cultivo ampliamente consumido a nivel mundial.

Materiales y métodos

El trabajo contempló la metodología de investigación mixta, integrando un enfoque estadístico y matemático. Se utilizó un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial de 2 x 4 donde el factor A fue la aplicación de materia orgánica (0 y 2%), y el factor B las fuentes de calcio (sin calcio, nitrato de calcio, sulfato de calcio y 50% nitrato de calcio + 50% sulfato de calcio), dando un total de ocho tratamientos. Cada tratamiento incluyó una población de 144 plantas distribuidas en cuatro repeticiones. Cada repetición contó con un grupo de 36 plantas, de las cuales se seleccionaron 10 para formar la muestra, según las indicaciones de Arispe et al. (2019). Las 26 plantas restantes se mantuvieron como parte del efecto de borde, conforme a lo recomendado por Peña-Becerril et al. (2005).

Manejo del ensayo

Preparación del suelo: se pesaron y dispusieron 4 kg de arena de río en cada maceta. Para los tratamientos que incluyeron materia orgánica, se añadieron 80 g de compost por maceta, realizando una mezcla homogénea.

Contaminación con cadmio (Cd): se llevó a cabo utilizando CdCl₂, aplicando 0,09 meq de Cd·100 g⁻¹. Para cada tratamiento, se pesó la cantidad correspondiente del contaminante y se diluyó en 100 mL de agua. Luego, se aplicó de manera uniforme mediante riego, 8 días antes de la siembra.

Aplicación de las fuentes de calcio (Ca): para cada tratamiento se aplicó 0,09 meq de Ca·100 g⁻¹ a través de las fuentes nitrato y sulfato de calcio, y se diluyó en 100 mL de agua y fue aplicado mediante el riego 5 días después de la contaminación con cadmio.

Reducción de la toxicidad de cadmio en maíz con calcio y materia orgánica

Siembra: las semillas se remojaron durante 24 horas antes de la siembra para asegurar su viabilidad. Se sembraron dos semillas por maceta y se mantuvo un riego constante para mantener la humedad del suelo en su capacidad de campo durante todo el período de investigación.

En la tabla 1 se muestra el análisis del suelo usado en la investigación, el cual presentó un pH ligeramente alcalino, contenido de materia orgánica bajo. Los niveles de nutrientes esenciales como fósforo, potasio, calcio y magnesio también fueron bajos en general.

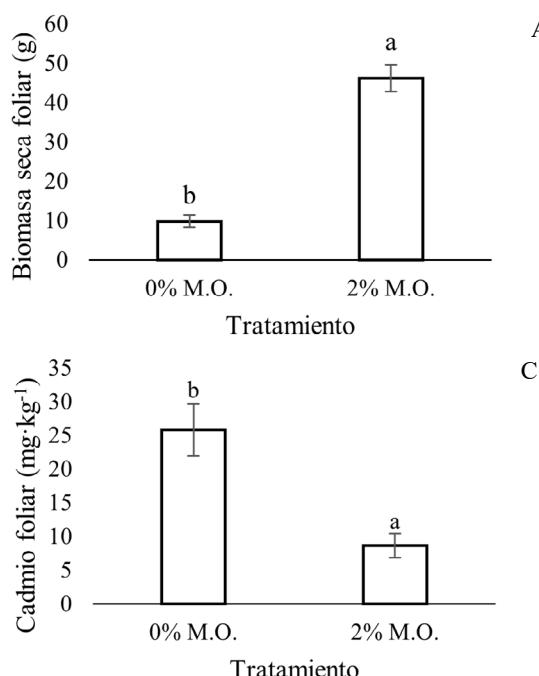
Tabla 1. Análisis físico-químico del suelo.

Clase textural	pH	Materia orgánica (%)	Fósforo (mg·kg ⁻¹)	Potasio (mq·100 g ⁻¹)	Calcio (mq·100 g ⁻¹)	Magnesio (mq·100 g ⁻¹)
Franco arenoso	7,6	0,9	1,3	0,06	1,4	0,24

El análisis químico del compost (tabla 2) mostró un pH cercano a la neutralidad. En cuanto a los macronutrientes, el nitrógeno se encontró en niveles adecuados, mientras que el fósforo (0,84%) y el potasio (1,04%) presentaron concentraciones moderadas. El calcio con un 3,43% destacó por su alta concentración, y el magnesio con un 0,82% se encontró en cantidades apropiadas para el desarrollo de las plantas.

Tabla 2. Análisis químico del compost.

pH	Materia orgánica (%)	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)	Calcio (%)	Magnesio (%)
7,47	42,68	1,98	0,84	1,04	3,43	0,82



Por otra parte, el material vegetal utilizado fue el híbrido de maíz trueno. Con el propósito de examinar el impacto de la aplicación de Ca y MO en la mitigación de la toxicidad del Cd en el maíz, se procedió a mantener las plantas en las macetas durante un período de 60 días. Durante este lapso, se registraron y analizaron las siguientes variables:

Biomasa seca de raíz y tallo: se extrajeron las plantas completas y se separó la parte aérea de la radical, se recolectaron 10 plantas de maíz por cada unidad experimental (considerando el efecto borde), y fueron llevadas a secado en una estufa a 70 °C, hasta obtener una biomasa constante, el cual indicó que la muestra estuvo totalmente seca (Andrade et al., 2023).

Concentración de Cd en raíz, tallo y suelo: una vez que las muestras de la planta fueron secadas, se llevaron a un proceso de digestión, con la finalidad de obtener una solución para luego realizar la lectura de la concentración de cadmio por medio del espectrofotómetro de absorción atómica (Pedraza y Rojas, 2017).

El análisis de datos se llevó a cabo utilizando ANOVA, en las variables que se encontró diferencias significativas se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia (alfa) de 0,05 y correlaciones. Todos los procesos estadísticos se realizaron utilizando el software informático InfoStat 2018.

Resultados y discusión

En la figura 1 se observan los resultados obtenidos tras la aplicación de MO, mismos que mostraron diferencias estadísticas significativas ($P<0,0001$) en la biomasa seca foliar y de la raíz del maíz. En el tratamiento sin aplicación de materia orgánica (0% MO), la biomasa seca foliar (BSF) y la biomasa seca de la raíz (BSR) fueron 9,79 y 7,20 g; respectivamente.

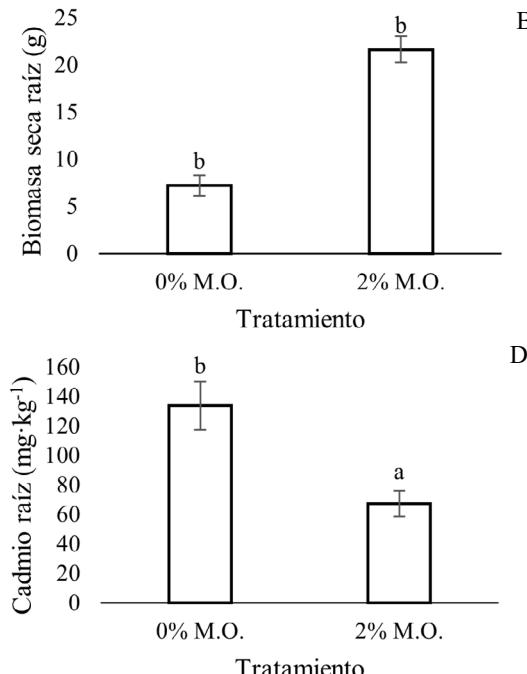


Figura 1. (A y B) Biomasa seca, y (C y D) concentración de Cd en tallo y raíz de maíz bajo condiciones de contaminación por Cd tras aplicación de materia orgánica.



Estos valores fueron significativamente menores en comparación con el tratamiento con 2% de MO, donde la BSF y la BSR alcanzaron 46,21 y 21,6 g; respectivamente. Por otra parte, la concentración de Cd en el follaje (CdF) y en la raíz (CdR) también presentó diferencias estadísticas significativas ($P<0,0001$). En el tratamiento sin MO, las concentraciones de CdF y CdR fueron de 25,8 y 133,7 mg·kg⁻¹; respectivamente. Estos valores fueron considerablemente más altos que en el tratamiento con 2% de MO, donde las concentraciones de CdF y CdR fueron de 8,6 y 67,2 mg·kg⁻¹; respectivamente.

Estos resultados sugirieron que la aplicación de MO a una concentración del 2% mejoró significativamente el crecimiento del maíz, aumentando la biomasa seca tanto del follaje como de la raíz, y reduce la acumulación de Cd en la planta. La MO ha sido ampliamente reconocida por su capacidad para mejorar la capacidad de retención de nutrientes y metales pesados en el suelo, así como para reducir su biodisponibilidad y movilidad (Li et al., 2019). Esto puede explicar el efecto positivo observado en la producción de biomasa en las plantas de maíz expuestas a Cd. En estudios similares, la aplicación de enmiendas como el biochar ha mostrado una reducción significativa en la movilidad

del Cd y su absorción por las plantas, lo cual es consistente con los hallazgos del presente estudio (Anwar et al., 2024).

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos en los diferentes tratamientos con Ca, los cuales presentaron variaciones significativas en la biomasa seca de la planta y en la concentración de Cd en el tallo y la raíz del maíz. En el tratamiento sin adición de Ca, la biomasa seca del follaje (BSF) y la biomasa seca de la raíz (BSR) fueron de 20,1 y 10,8 g, respectivamente. La concentración de Cd en el follaje (CdF) y en la raíz (CdR) fueron de 25,4 y 135,8 mg·kg⁻¹; respectivamente. Estos valores sirvieron como referencia para comparar la efectividad de los tratamientos con diferentes formas de Ca.

Por otro lado, el $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ puede jugar un papel crucial en la mitigación de los efectos negativos del Cd en las plantas de maíz. Se ha demostrado que el calcio compite con el Cd por los sitios de absorción en las raíces, reduciendo así su entrada en los tejidos vegetales y limitando su toxicidad (Varma et al., 2017). Además, el Ca puede activar mecanismos de tolerancia al estrés en las plantas y la regulación de la homeostasis iónica (Choudhary et al., 2010). Estos estudios ayudaron a proporcionar una explicación para los resultados obtenidos en esta investigación.

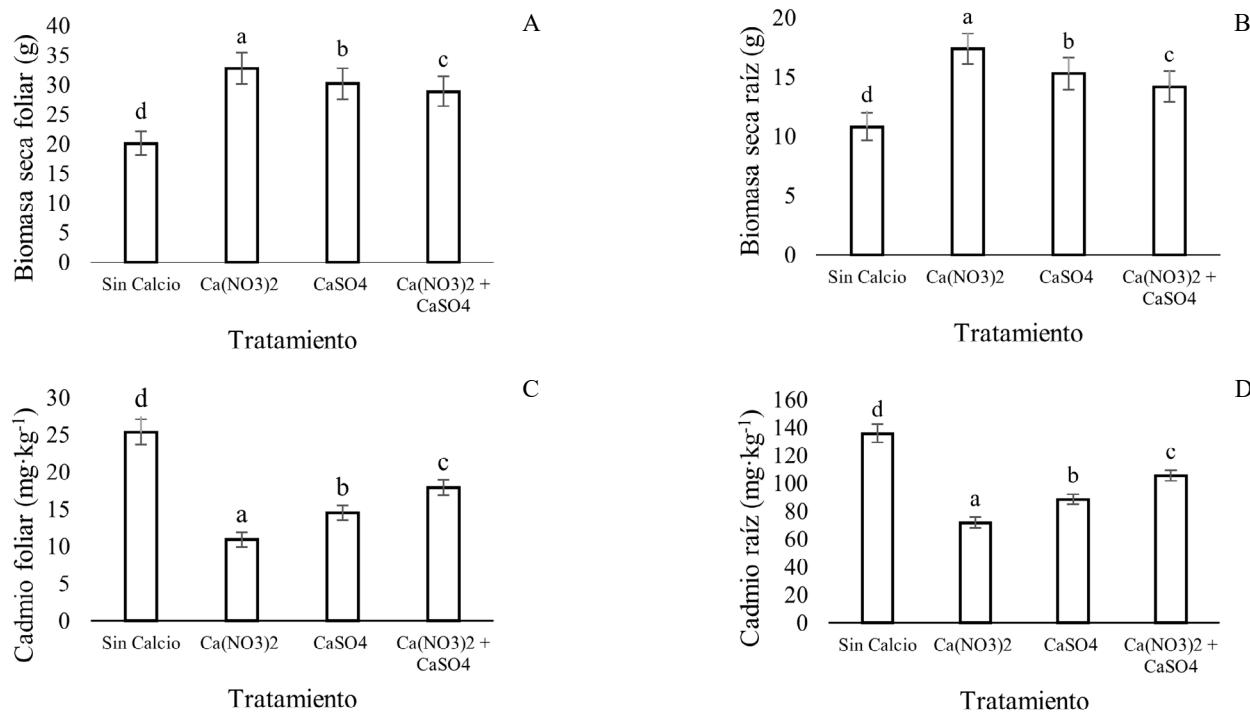


Figura 2. (A y B) Biomasa seca y (C y D) concentración de cadmio en tallo y raíz de maíz bajo condiciones de contaminación por cadmio tras aplicación de diferentes fuentes de calcio.

Reducción de la toxicidad de cadmio en maíz con calcio y materia orgánica

En la tabla 3, se observa que la biomasa seca foliar (BSF) varió significativamente entre los tratamientos, según lo indicó la probabilidad ANOVA ($P<0,0001$), lo que sugirió un efecto claro de la aplicación de MO y las diferentes fuentes de Ca.

Tabla 3. Evaluación de la biomasa seca foliar y de la raíz y la concentración de cadmio foliar y de la raíz, en plantas de maíz expuestas a contaminación con cadmio en condiciones de macetas, tras la aplicación de materia orgánica y diferentes fuentes de calcio.

Tratamiento	BSF (g)	BSR (g)	Cd foliar (mg·kg ⁻¹)	Cd raíz (mg·kg ⁻¹)
0% MO + Sin Calcio	5,1 ± 0,21 g	4,3 ± 0,12 h	37,8 ± 0,53 h	184,4 ± 5,04 h
0% MO + Ca(NO ₃) ₂	13,2 ± 0,18 e	10,2 ± 0,08 e	18,0 ± 0,33 e	100,9 ± 1,85 e
0% MO + CaSO ₄	10,7 ± 0,26 f	7,7 ± 0,14 f	21,8 ± 0,35 f	115,4 ± 1,79 f
0% MO + Ca(NO ₃) ₂ + CaSO ₄	10,2 ± 0,31 f	6,9 ± 0,09 g	25,5 ± 0,44 g	133,9 ± 1,39 g
2% MO + Sin Calcio	35,2 ± 0,36 d	17,4 ± 0,34 d	12,9 ± 0,66 d	87,2 ± 1,96 d
2% MO + Ca(NO ₃) ₂	52,4 ± 0,21 a	24,6 ± 0,19 a	3,8 ± 0,27 a	42,8 ± 0,76 a
2% MO + CaSO ₄	49,6 ± 0,54 b	22,9 ± 0,26 b	7,3 ± 0,24 b	61,6 ± 0,92 b
2% MO + Ca(NO ₃) ₂ + CaSO ₄	47,6 ± 0,31 c	21,7 ± 0,09 c	10,5 ± 0,35 c	77,2 ± 0,56 c
CV (%)	2,19	2,23	4,9	3,52
Probabilidad ANOVA	P<0,0001	P<0,0001	P<0,0001	P<0,0001

Medias con letras comunes no fueron significativamente diferentes entre los tratamientos de cada variable ($P>0,05$). Abreviaturas: BSF= biomasa seca foliar, BSR= biomasa seca de la raíz, CV= coeficiente de variación.

La aplicación de calcio tuvo un impacto positivo en la biomasa seca de la parte foliar (BSF), destacando el uso de Ca(NO₃)₂, que mostró el mayor aumento en comparación con otros tratamientos. Aunque la combinación de Ca(NO₃)₂ y SO₄Ca también incrementó la BSF, no superó la eficacia del nitrato de calcio solo, lo que sugirió que el uso de una única fuente de calcio puede ser más eficiente. Además, la incorporación de materia orgánica demostró una influencia significativa en la mejora de la BSF en todos los tratamientos, especialmente cuando se combinó con Ca(NO₃)₂, alcanzando el valor máximo de BSF.

En el caso de la biomasa seca de la raíz (BSR), se observó una tendencia similar: los tratamientos con Ca(NO₃)₂ lograron el mayor incremento en comparación con los tratamientos sin calcio. La combinación de calcio con materia orgánica también potenció la BSR, corroborando la importancia de la materia orgánica como complemento. Estos resultados indicaron que tanto el tipo de fuente de calcio como la adición de materia orgánica fueron factores determinantes para optimizar la BSF y la BSR en maíz, siendo el Ca(NO₃)₂ la fuente más efectiva en ambas variables.

La concentración de Cd en hojas mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P<0,0001$).

La aplicación de calcio y materia orgánica mostró efectos significativos en la mitigación de la absorción de cadmio en plantas de maíz, destacando su potencial como estrategias de fitoremediaciόn en suelos contaminados. La ausencia de Ca resultó en la concentración más alta de Cd en hojas, lo que sugirió que, sin un agente estabilizante, el Cd se acumuló libremente en el tejido vegetal. La adición de Ca(NO₃)₂ fue particularmente efectiva, reduciendo a la mitad esta concentración, lo que indicó un efecto protector notable. La aplicación de CaSO₄ y la combinación de Ca(NO₃)₂ + CaSO₄ también redujeron los niveles de Cd, aunque de forma menos eficaz que Ca(NO₃)₂. Estos resultados resaltaron el papel del calcio en reducir la absorción de Cd y sugirieron que la forma en que se aplicó puede influir en la eficiencia de mitigación.

La presencia de MO amplió estos efectos, contribuyendo a una disminución general en la absorción de Cd, probablemente debido a su capacidad para mejorar las propiedades del suelo y promover la inmovilización del metal. El tratamiento con MO y Ca(NO₃)₂ logró la menor concentración de Cd en hojas y raíces, lo que subrayó la sinergia entre MO y calcio en la mitigación de la toxicidad del Cd. Estos resultados fueron consistentes con investigaciones previas, como la de Kaleem et al. (2022), que recalcaron el rol crítico del calcio en la regulación del estrés oxidativo inducido por metales pesados en plantas. Por ejemplo, Zhang et al. (2020) demostraron que la aplicación de calcio redujo la absorción de cadmio al competir con este metal en los sitios de absorción de las raíces, limitando su entrada en la planta. Asimismo, Choong et al. (2014) encontraron que el calcio disminuyó la absorción de cadmio al competir por los canales de transporte celular debido a sus semejanzas físico-químicas, bloqueando así la entrada del cadmio en las células. Además, el calcio puede desplazar el cadmio de sitios de unión críticos en proteínas celulares, reduciendo los efectos tóxicos y la acumulación de cadmio en tejidos vegetales.

Además, los resultados de este estudio demostraron que la aplicación conjunta de calcio (Ca) y materia orgánica (MO) al 2% en suelos contaminados fue una estrategia efectiva para reducir la absorción de cadmio (Cd) en cultivos de maíz. Esta combinación no solo minimizó la acumulación de Cd en los tejidos vegetales, sino que también incrementó la producción de biomasa, un indicador clave para mantener la productividad agrícola en suelos afectados por metales pesados. Estos hallazgos sugirieron que el uso de MO y Ca en suelos contaminados podría ser una práctica sostenible para mitigar la toxicidad del Cd, abordando los riesgos ambientales y alimentarios que este metal pesado representó. El Cd, un contaminante tóxico asociado a actividades industriales y agrícolas, fue capaz de acumularse en los suelos, generando una amenaza significativa para la salud humana y el ambiente (Alloway, 2012).

La notable reducción en la concentración de Cd en las hojas y raíces con la aplicación de Ca, especialmente cuando se combina con MO, subraya la sinergia entre estos tratamientos para limitar la bioacumulación de Cd. Este efecto puede explicarse por la



capacidad del Ca para formar complejos estables con el Cd, lo que disminuyó su movilidad y su absorción por las raíces de las plantas (Mazhar et al., 2023). Adicionalmente, la MO mejora la capacidad de retención de nutrientes del suelo, incrementando la disponibilidad de Ca y otros nutrientes esenciales para las plantas, lo que reforzó la mitigación de la toxicidad por Cd (Fang et al., 2024). Adicionalmente, Cai et al. (2021) y Safari et al. (2024), sugirieron que la combinación de MO y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ parece ser más eficaz en la reducción de la absorción de Cd por el maíz, posiblemente debido a la mejora en la estructura del suelo y la retención de nutrientes promovida por estas enmiendas.

La figura 3 muestra una correlación positiva fuerte ($r = 0,954$) entre la biomasa seca foliar y la biomasa seca de la raíz, esto indicó que, a medida que aumentó la biomasa en las hojas, también se incrementó la biomasa en las raíces. Esta relación es esperada, ya que un mayor crecimiento de la parte aérea generalmente se acompaña de un desarrollo proporcional en el sistema radical, reflejando un estado general de salud y vigor en la planta (Bektas et al., 2023).

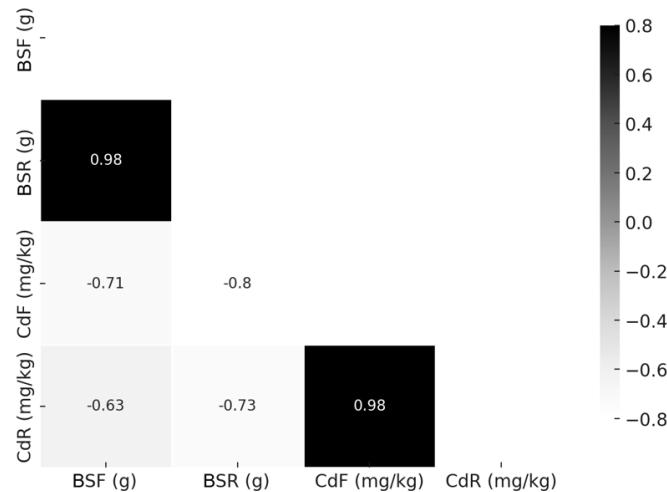


Figura 3. Matriz de correlación entre variables de biomasa seca y concentración de cadmio. BSF: biomasa seca foliar; BSR: biomasa seca de la raíz; CdF: cadmio foliar; CdR: cadmio en la raíz.

Por otra parte, hubo una correlación negativa moderada entre la biomasa seca foliar y la concentración de Cd en las hojas ($r = -0,746$). Esto implicó que a medida que aumentó la concentración de Cd en las hojas, la biomasa seca foliar tendió a disminuir.

Esta relación fue coherente con el efecto tóxico del Cd, que inhibió el crecimiento y desarrollo de las plantas al interferir con la fotosíntesis, la respiración y otros procesos metabólicos

claves. Por lo tanto, una mayor absorción de Cd se asoció con una reducción en el crecimiento foliar (Aslam et al., 2023).

Similar a la relación anterior, la correlación negativa entre la biomasa seca foliar y la concentración de Cd en las raíces ($r = -0,709$) indicó que un mayor contenido de Cd en las raíces también se asoció con una reducción en la biomasa seca foliar.

La correlación negativa entre la biomasa seca de la raíz y la concentración de Cd en las hojas ($r = -0,8$) sugirió que un aumento en la absorción de Cd en las hojas se asoció con una reducción en el desarrollo radical. Dado que el sistema radical es esencial para la absorción de agua y nutrientes, la presencia de Cd puede dañar las raíces, reduciendo así su biomasa y afectando la capacidad de la planta para sostener un crecimiento saludable (Kumar et al., 2024).

Existe una correlación negativa moderada entre la biomasa seca de la raíz y la concentración de Cd en las raíces ($r = -0,73$). Esto indicó que un mayor contenido de Cd en las raíces se asoció con una disminución en la biomasa radical. Este resultado fue consistente con la toxicidad del Cd, que puede dañar las raíces directamente, afectando su desarrollo y función (Mongkhonsin et al., 2018).

La correlación positiva muy fuerte ($r = 0,98$) entre la concentración de Cd en las hojas y en las raíces indicó que, en general, a medida que aumentó la acumulación de Cd en las raíces, también lo hizo en las hojas. Esto sugirió que las plantas con una alta capacidad de absorción de Cd tendieron a translocar este metal desde las raíces hacia las hojas, lo que podría ser un mecanismo para minimizar el daño radical pero que, a su vez, expuso a los tejidos foliares al estrés por Cd (Zhang et al., 2024).

Conclusión

Se evidencia que el calcio y la materia orgánica desempeñan un papel clave en la reducción de la disponibilidad de cadmio en el suelo, puesto que el calcio compite directamente como catión y la materia orgánica favorece la formación de complejos insolubles con los metales; sin embargo, la influencia del pH, inversamente relacionada con la solubilidad de los metales pesados, es un factor crítico que también debe considerarse en la disponibilidad de estos elementos.

Conflictos de intereses

Las autoras declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

Referencias bibliográficas

- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Vol. 22. Springer Science & Business Media.



- Andrade, K., Rivera-Fernández, R. D., y Cuenca, E. C. (2023). Efecto de distintos niveles de fertilización en el comportamiento agronómico del frijol caupí INIAP-463. *La Técnica*, 13(2), 61-66. <https://doi.org/10.33936/latecnica.v13i2.5375>
- Angon, P. B., Islam, M. S., Kc, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., and Suchi, S. A. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10(7), e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
- Anwar, T., Qureshi, H., Jabeen, M., Zaman, W., and Ali, H. M. (2024). Mitigation of cadmium-induced stress in maize via synergistic application of biochar and gibberellin acid to enhance morpho-physiological and biochemical traits. *BMC Plant Biology*, 24(1), 192. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04805-2>
- Arispe, J. L., Sánchez, A., y Galindo, M. E. (2019). Presencia de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera:Crambidae) en Tepalcingo, Morelos, México, con evaluación del daño causado en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Chilena de Entomología*, 45(4). <https://www.biota.org/rce/article/view/57568>
- Aslam, M. M., Okal, E. J., and Waseem, M. (2023). Cadmium toxicity impacts plant growth and plant remediation strategies. *Plant Growth Regulation*, 99(3), 397-412. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00917-7>
- Bektas, H., Hohn, C. E., Lukaszewski, A. J., and Waines, J. G. (2023). On the possible trade-off between shoot and root biomass in wheat. *Plants*, 12(13), 2513. <https://doi.org/10.3390/plants12132513>
- Cai, Y., Wang, X., Beesley, L., Zhang, Z., Zhi, S., and Ding, Y. (2021). Cadmium uptake reduction in paddy rice with a combination of water management, soil application of calcium magnesium phosphate and foliar spraying of Si/Se. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50378-50387. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13512-6>
- Chen, Q., Wang, L., Li, B., He, S., Li, Y., He, Y., Liang, X., and Zhan, F. (2024). Remediation of cadmium and lead in mine soil by ameliorants and its impact on maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Agronomy*, 14(2), 372. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020372>
- Choong, G., Liu, Y., and Templeton, D. M. (2014). Interplay of calcium and cadmium in mediating cadmium toxicity. *Chemico-Biological Interactions*, 211, 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.01.007>
- Choudhary, S. P., Bhardwaj, R., Gupta, B. D., Dutt, P., Gupta, R. K., Biondi, S., and Kanwar, M. (2010). Epibrassinolide induces changes in indole-3-acetic acid, abscisic acid and polyamine concentrations and enhances antioxidant potential of radish seedlings under copper stress. *Physiologia Plantarum*, 140(3), 280-296. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2010.01403.x>
- Daripa, A., Malav, L. C., Yadav, D. K., and Chattaraj, S. (2023). Metal contamination in water resources due to various anthropogenic activities. (pp. 111-127). In: *Metals in water*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116189>
- Fang, X., Lee, X., Twagirayezu, G., Cheng, H., Lu, H., Huang, S., Deng, L., Ji, B. (2024). A critical review of the effectiveness of biochar coupled with arbuscular mycorrhizal fungi in soil cadmium immobilization. *Journal of Fungi*, 10(3), 182. <https://doi.org/10.3390/jof10030182>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., and Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Hayat, M. T., Nauman, M., Nazir, N., Ali, S., and Bangash, N. (2019). Environmental hazard of cadmium: past, present, and future. (pp. 163-183). In: *Cadmium toxicity and tolerance in plants*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00007-3>
- Hembrom, S., Singh, B., Gupta, S. K., and Nema, A. K. (2020). A comprehensive evaluation of heavy metal contamination in foodstuff and associated human health risk: a global perspective. *Contemporary environmental issues and challenges in era of climate change*. pp. 33-63. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7_2
- Kaleem, M., Shabir, F., Hussain, I., Hameed, M., Ahmad, M. S. A., Mehmood, A., Ashfaq, W., Riaz, S., Afzaal, Z., Faisal Maqsood, M., Iqbal, U., Shah, S., and Irshad, M. (2022). Alleviation of cadmium toxicity in *Zea mays* L. through up-regulation of growth, antioxidant defense system and organic osmolytes under calcium supplementation. *Plos One*, 17(6), e0269162. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269162>
- Kumar, R., Kumar, V., Tandon, V., Kumar, S., and Roohi, T. (2024). Effect and responses of cadmium in plants. (pp. 327-347). In: *Cadmium Toxicity in Water: Challenges and Solutions*. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54005-9_13
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., and Han, W. (2019). A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 28(4), 380-394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>



- Luo, M., Cao, H. M., Fan, Y. Y., Zhou, X. C., Chen, J. X., Chung, H., and Wei, H. Y. (2019). Bioaccumulation of cadmium affects development, mating behavior, and fecundity in the Asian Corn Borer, *Ostrinia furnacalis*. *Insects*, 11(1), 7. <https://doi.org/10.3390/insects11010007>
- Mazhar, M. W., Ishtiaq, M., Maqbool, M., Ajaib, M., Hussain, I., Hussain, T., Parveen, A., Thind, S., Sardar, T., Akram, R., Azeem, M., and Gul, A. (2023). Synergistic application of calcium oxide nanoparticles and farmyard manure induces cadmium tolerance in mungbean (*Vigna radiata* L.) by influencing physiological and biochemical parameters. *PLoS One*, 18(3), e0282531. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282531>
- Mongkhonsin, B., Nakbanpote, W., Meesungnoen, O., and Prasad, M. N. V. (2018). Adaptive and tolerance mechanisms in herbaceous plants exposed to cadmium. In: *Cadmium toxicity and tolerance in plants: From physiology to mediation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00004-8>
- Pedraza, E. T., y Rojas, M. Á. H. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 1(2), 69-78. <https://doi.org/10.25127/aps.20172.365>
- Peña-Becerril, J. C., Monroy-Ata, A., Álvarez-Sánchez, F. J., y Orozco-Almanza, M. S. (2005). Uso del efecto de borde de la vegetación para la restauración ecológica del bosque tropical. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 8(2), 91-98. <https://www.redalyc.org/pdf/432/43220804.pdf>
- Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., and Beck, L. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutant affecting crop health. *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
- Rouf Shah, T., Prasad, K., and Kumar, P. (2016). Maize -A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1166995. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- Safari Sinegani, M., Manzoor, M., and Mühlung, K. H. (2024). Calcium-associated anions play a dual role in modulating cadmium uptake and translocation in wheat. *Pollutants*, 4(3), 340-349. <https://doi.org/10.3390/pollutants4030023>
- Sui, F., Yang, Y., Wu, Y., Yan, J., Fu, H., Li, C., Qin, S., Wang, L., Zhang, W., Gao, W., Liu, H., and Zhao, P. (2024). Cadmium minimization in grains of maize and wheat grown on smelting-impacted land ameliorated by limestone. *Toxics*, 12(8), 532. <https://doi.org/10.3390/toxics12080532>
- Varma, A., Prasad, R., and Tuteja, N. (Eds.). (2017). *Mycorrhiza-eco-physiology, secondary metabolites, nanomaterials*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57849-1>
- Zhang, S., Li, Q., Nazir, M. M., Ali, S., Ouyang, Y., Ye, S., and Zeng, F. (2020). Calcium plays a double-edged role in modulating cadmium uptake and translocation in rice. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(21), 8058. <https://doi.org/10.3390/ijms21218058>
- Zhang, X., Yang, M., Yang, H., Pian, R., Wang, J., and Wu, A. M. (2024). The uptake, transfer, and detoxification of cadmium in plants and its exogenous effects. *Cells*, 13(11), 907. <https://doi.org/10.3390/cells13110907>

Declaración de contribución a la autoría según CRediT

Ana Karen Cobeña Loor: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición. **Jessica Jesseña Morán Morán:** análisis formal, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.