



RESEARCH ARTICLE



Impact of cadmium on photosynthetic pigments, root structure, and nutrient concentrations in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants

Efecto del cadmio en el contenido de pigmentos fotosintéticos, estructura de la raíz, y concentración de nutrientes en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

Paulina Beatriz Gutiérrez-Martínez¹ ; Blanca Catalina Ramírez-Hernández¹ ;
Marcela Mariel Maldonado-Villegas^{1,*} 

¹ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias; Camino Ramón Padilla Sánchez No. 2100 Nextipac, Zapopan, Jalisco C.P. 45200. México.

* Corresponding author: marcela.maldonado@academicos.udg.mx (M. M. Maldonado-Villegas).

Received: 23 February 2024. Accepted: 9 September 2024. Published: 28 September 2024.

Abstract

Cadmium (Cd) is a contaminant that causes significant damage to organisms. In plants, it results in growth delay, alters photosynthetic function, and affects nutrient concentrations. This study aimed to evaluate the impact of Cd (0, 0.25, 0.50, and 1 μ M) on chlorophyll content, structural damage to the root, and the absorption and translocation of nutrients (Ca, K, Mg, Mn, Fe, and Zn) in *Phaseolus vulgaris* var. Opus plants. An increase in chlorophyll a was observed at Cd concentrations of 0.25 and 1 μ M. Chlorophyll b increased across all Cd treatments, while carotenoid content decreased in all treatments. The roots exhibited structural damage as Cd concentrations increased. For nutrients, Ca, Mg, Mn, and Zn in leaves, and K in stems, increased with higher Cd doses. Conversely, K in roots decreased with higher Cd concentrations, and Fe decreased compared to the control in all evaluated organs. Our results suggest that Cd stress at low concentrations stimulates chlorophyll synthesis and that varying Cd concentrations induce synergistic and antagonistic effects in different organs of *P. vulgaris*, leading to nutritional disorders. Given the global importance of this crop, studying the molecular mechanisms and membrane transporters in *P. vulgaris* roots exposed to Cd is crucial for enhancing its resistance to Cd.

Keywords: toxicity; tissues; photosynthesis; heavy metals; synergism; antagonism.

Resumen

El cadmio es un contaminante que causa daños a los organismos, en plantas provoca un retraso en el crecimiento, altera la función fotosintética y la concentración de nutrientes. El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia del Cd (0, 0.25, 0.50 y 1 μ M) en el contenido de clorofila, daño estructural a la raíz, y la absorción y translocación de nutrientes (Ca, K, Mg, Mn, Fe y Zn) en plantas de *Phaseolus vulgaris* var. Opus. Se observó un incremento en la clorofila a en concentraciones de 0.25 y 1 μ M de Cd, la clorofila b aumentó en los tres tratamientos con Cd y el contenido de carotenoides disminuyó en todos los tratamientos. Las raíces mostraron daño estructural por el incremento del Cd. Con relación a los nutrientes, el Ca, Mg, Mn, Zn en hoja y el K en tallo aumentaron sus concentraciones al incrementar la dosis de Cd; contrariamente el K en raíz disminuyó al aumentar las concentraciones de Cd; para el caso del Fe disminuyó respecto al tratamiento control en todos los órganos evaluados. Nuestros resultados sugieren que el estrés por el Cd a bajas concentraciones estimula la síntesis de clorofila, además las diferentes concentraciones de este contaminante, provoca sinergismos y antagonismos en los diferentes órganos de *P. vulgaris*, lo que conlleva a desórdenes nutricionales. Al ser un cultivo de importancia mundial, investigar los mecanismos moleculares y transportadores de membrana en raíces de *P. vulgaris* expuestas al Cd, es importante para mejorar su resistencia al Cd.

Palabras clave: toxicidad; tejidos; fotosíntesis; metales pesados; sinergismo; antagonismo.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.035>

Cite this article:

Gutiérrez-Martínez, P. B., Ramírez-Hernández, B. C., & Maldonado-Villegas, M. M. (2024). Efecto del cadmio en el contenido de pigmentos fotosintéticos, estructura de la raíz, y concentración de nutrientes en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Agropecuaria*, 15(4), 483-493.

1. Introducción

El uso de agroquímicos para aumentar la producción y rendimiento de los cultivos ha ocasionado un incremento de la contaminación por metales pesados y su posible ingreso a la cadena trófica. De

todos los metales pesados, el Cd es de los más tóxicos, y actividades como la industrialización, las prácticas agrícolas y la minería han provocado el aumento de Cd en el ambiente (Goyal et al., 2020; Saleem et al., 2024) por lo que representa una

amenaza potencial para la salud de plantas, humanos y animales aún en bajas concentraciones (Baruah et al., 2023); prevalece en suelos agrícolas y es acumulado fácilmente en ciertos cultivos (Yang et al., 2024). Además, influye de manera negativa en las plantas, ya que puede generar daño oxidativo (Haider et al., 2021), cambios en el crecimiento, interfiere con la fotosíntesis y reduce el contenido de clorofila (Sardar et al., 2022; Saleem et al., 2024). Las plantas absorben el ion Cd^{+2} por la raíz a través de los mismos transportadores de membrana plasmática de otros iones divalentes como el Ca^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Mg^{+2} , Cu^{+2} y Zn^{+2} (Kaushik et al., 2024). Sin embargo, se ha reportado que el Cd influye de manera diferente en el contenido de nutrientes dependiendo de la especie, la etapa de crecimiento y el órgano (Gonçalves et al., 2009a). Por lo que el efecto del Cd en la acumulación y distribución de los elementos esenciales puede revelar su fitotoxicidad (Zaid et al., 2020; Liu et al., 2023a). En este sentido, Haider et al. (2021), mencionan que el Cd interactúa con el uso, almacenamiento y utilización de nutrientes y la absorción de agua. Se han visto deficiencias de nutrientes en cultivos de *Cucumis sativus* (Sun et al., 2017) y *Zea mays* (Yerlikaya Anli et al., 2022). No obstante, en hojas de *Solanum lycopersicum* el Cd mostró un efecto sinérgico con el Mg, Ca, Fe y Zn y en frutos un efecto antagónico con el Mn y Zn (Kisa et al., 2016). La explicación a este comportamiento aún no es claro, por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia del Cd en el contenido de clorofila, el daño a la raíz y la absorción y translocación de Ca, K, Mg, Fe, Mn y Zn en frijol (*Phaseolus vulgaris* var. Opus).

2. Metodología

Se utilizó nitrato de cadmio [$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$] a diferentes concentraciones: 0 μM (control), 0,25 μM , 0,50 μM y 1 μM ; con 5 plantas por tratamiento.

2.1. Condiciones de cultivo y diseño experimental

Las semillas de *Phaseolus vulgaris* var. Opus fueron esterilizadas con hipoclorito de sodio al 0,1% por 15 min, se enjuagaron con agua desionizada, se colocaron en semilleros utilizando turba como sustrato, a una temperatura de 20/25 °C, humedad relativa del 65% y 10 h de fotoperiodo. El trasplante se llevó a cabo a los 15 días después de la siembra colocándose en un sistema semi-hidropónico en macetas de plástico, en un invernadero bajo condiciones de luz natural. El sustrato utilizado fue perlita previamente esterilizada y turba (3:1) (pH 4,97; 0,24 dS m^{-1} y una capacidad de intercambio catiónico de 86,45 cmol+kg). Se empleó la solución nutritiva propuesta por Chaoui et al. (1997) considerando los nutrientes contenidos en el agua (Tabla A1, ver Anexo). Se adicionaron diariamente 200 mL de la solución nutritiva a cada maceta. Una vez que las plántulas alcanzaron la etapa vegetativa V4 (tercera hoja trifoliada), según la clasificación de Escalante & Kohashi (1993), se suplementó la solución nutritiva de acuerdo con cada tratamiento (0 μM , 0,25 μM , 0,50 μM y 1 μM). Para el análisis de pigmentos fotosintéticos, las hojas fueron colectadas 15 días posteriores al comienzo de cada tratamiento; y para la determinación de los nutrientes y los análisis de microscopía electrónica de barrido. Las hojas y las raíces fueron tomados una vez que comenzó la etapa R8 (llenado de vainas) (Figura 1).

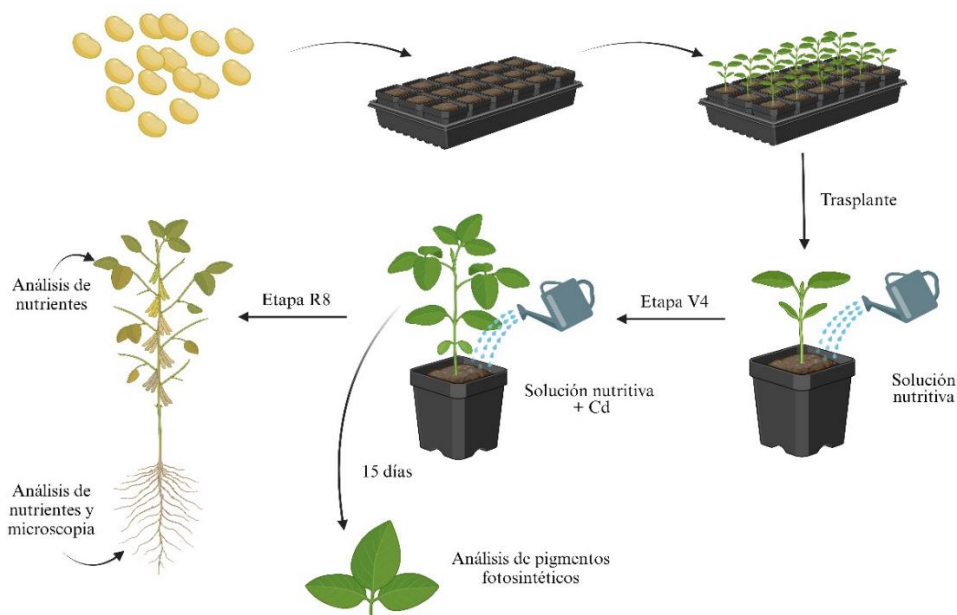


Figura 1. Diseño experimental del estudio. Creado con BioRender.com

2.2. Cuantificación de los pigmentos fotosintéticos

El contenido de clorofila *a*, *b* y los carotenoides se determinaron según Arnon (1949) con algunas modificaciones. La extracción se realizó macerando 1 g de muestra vegetal con 7 mL de acetona fría al 80% (v/v) y posteriormente se añadieron 2 mL de acetona para macerar el tejido faltante. El extracto se aforó a 15 mL con acetona (80%) y se centrifugó a 2000 rpm durante 10 min (HERMLE, Z233 MK-2, Alemania). Se tomaron 0,5 mL del sobrenadante y se añadieron 2 mL de acetona (80%). Los pigmentos fueron determinados con un espectrofotómetro UV-VIS (JENWAY, 7305, EE. UU.) a 663, 645 y 470 nm.

2.3. Microscopía electrónica de barrido

Se tomaron 5 mm de longitud de hoja y raíz de cada tratamiento; cada muestra se fijó con glutaraldehído al 2,5% en tampón de cacodilato de sodio 0,1 M (pH 7,2) y sacarosa 0,2 M (Schmidt et al., 2009). La fijación se llevó a cabo durante 12 h a 4 °C bajo vacío, seguido de 3 enjuagues en tampón de cacodilato de sodio (0,05 M a pH 7,2). Cada muestra se montó en un trozo de metal y se recubrió con una capa fina de carbono para prevenir o reducir el efecto de la carga eléctrica. Las observaciones se realizaron en microscopio electrónico de barrido acoplado a un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDS) (JEOL, JSM 6610, EE. UU.), bajo vacío, utilizando imágenes de electrones retrodispersados.

2.4. Determinación de nutrientes

Las raíces y las hojas se lavaron con agua deionizada y se secaron en un horno a 80 °C; posteriormente, las muestras se trituraron y se tomaron 0,5 g de muestra y fueron digeridas con 15 mL de HNO₃ concentrado en un digestor de microondas (CEM, MARS 5, EE. UU.). La potencia utilizada fue de 1200 W, a una presión de 195 psi y temperatura de 210 °C. El tiempo de rampa y retención se fijaron en 15 y 10 min, respectivamente. Una vez terminada la digestión ácida, cada muestra se filtró con papel filtro de 42 µm y se aforó con agua desionizada a un volumen final de 100 mL. El contenido de los nutrientes K, Ca, Mg, Fe, Mn y Zn, se determinaron mediante espectroscopia de emisión atómica con

plasma de microondas (MP-AES) (Agilent Technologies, Modelo 4200, EE. UU.). Cada nutriente fue determinado a las siguientes longitudes de onda: K: λ_{\max} = 766,491 nm; Ca: λ_{\max} = 396,847 nm; Mg: λ_{\max} = 279,553 nm; Fe: λ_{\max} = 259,940 nm; Mn: λ_{\max} = 257,610 nm y Zn: λ_{\max} = 213,857 nm. Asimismo, se realizaron las curvas de calibración con soluciones multi-estándares de K, Ca y Mg (0; 5; 10; 25; 50 y 75 mg L⁻¹) y Fe, Mn y Zn (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4 y 0,8 mg L⁻¹).

2.5. Análisis estadístico

Los datos se basaron en cinco muestras independientes de cada tratamiento (control = 0, 0,25 µM, 0,50 µM y 1 µM). Los datos fueron expresados como la media ± desviación estándar. La normalidad se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad se verificó utilizando la prueba de Levene. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de la prueba de Holm-Sidak para comparaciones múltiples; los datos que no cumplieron con normalidad y/o homocedasticidad se utilizó un análisis de varianza basado en rangos seguido de la prueba de Tukey para comparaciones múltiples. Se utilizó el software SPSS 29.0.2.0; se consideró una diferencia significativa al nivel $p \leq 0,05$.

3. Resultados y discusión

3.1. Contenido de pigmentos fotosintéticos

Las plantas tratadas con 0,25 µM, 0,50 µM y 1 µM de Cd no mostraron diferencias significativas en el contenido de clorofila *a*, *b* y carotenoides ($p = 0,546$, $p = 0,843$ y $p = 0,405$, respectivamente). No obstante, el contenido de clorofila *a* aumentó con el tratamiento 0,25 µM. El contenido de clorofila *b* aumentó en los tratamientos con Cd y los carotenoides disminuyeron en los tres tratamientos con Cd (Tabla 1).

La disminución del contenido de clorofila es una de las respuestas más comunes al estrés por Cd, como en plantas de *Satureja hortensis* (Azizollahi et al., 2019), *Capsicum annum* (Sana et al., 2024), *Lactuca sativa* (Chen et al., 2022) y *Sassafras tzumu* (Zhao et al., 2021).

Tabla 1

Contenido de pigmentos fotosintéticos (mg g⁻¹ tejido fresco) en las hojas de *Phaseolus vulgaris*. Cada valor representa la media ± DE ($n = 5$)

	Control	0,25 µM	0,50 µM	1 µM
Clorofila <i>a</i>	0,56 ± 0,07	0,61 ± 0,10	0,56 ± 0,07	0,53 ± 0,11
Clorofila <i>b</i>	0,49 ± 0,20	0,57 ± 0,09	0,54 ± 0,07	0,50 ± 0,09
Carotenoides	0,18 ± 0,02	0,17 ± 0,03	0,15 ± 0,03	0,15 ± 0,03

Se observó un aumento en la clorofila con $0,25 \mu\text{M}$ de Cd y su posterior disminución, esta respuesta también se ha observado en plantas de *Tagetes erecta* (Shah et al., 2017), *Glycine soja* (Liu et al., 2018) y *Z. mays* (B84) (Franić et al., 2018). Se ha observado en varios organismos una estimulación en bajas dosis e inhibición en dosis altas, lo que se denomina como "hormesis" (Carvalho et al., 2020) lo cual indica que a una baja concentración se puede estimular la síntesis de clorofila. Por otro lado, los carotenoides tienen una función importante en la protección del aparato fotosintético (Taiz & Zeiger, 2010); sin embargo, en *P. vulgaris* la reducción de los carotenoides podría indicar que el Cd causó estrés oxidativo al inhibir la producción de estos pigmentos.

3.2. Análisis SEM-EDS en raíces

El análisis SEM muestra daño anatómico en las raíces de los tratamientos con Cd (Figura 2) y los espectros EDS confirman la presencia de Cd en raíces (Figura 3). Se observa en la Figura 2 presencia de daño anatómico en las capas superficiales de las raíces con los tratamientos con Cd, ya que estas

exhiben una descamación en comparación con el control, siendo más evidente con la adición de $1 \mu\text{M}$ de Cd. Las alteraciones en los rasgos morfológicos, arquitectónicos y anatómicos de las raíces es una estrategia en respuesta a la toxicidad por Cd (An et al., 2023), la acumulación de este metal pesado en las raíces puede distorsionar la arquitectura de la raíz ocasionando daño estructural.

En las raíces de *Athyrium yokoscense*, el Cd se distribuyó principalmente en la región de la pared celular y el espacio intercelular (Ukai et al., 2023). Bora & Sarma (2021) detectaron picaduras laterales escalariiformes en las paredes laterales de las traqueidas y una reducción significativa en las raíces de *Ceratopteris pteridoides* tratadas con $40 \mu\text{M}$ de Cd. En raíces de *Populus alba* el Cd se encontró disperso en los tejidos radiculares, pero no se observó ninguna reducción celular importante ni necrosis tisular, por lo que la pared celular podría ser la primera barrera de protección especialmente en concentraciones bajas-medias y tiempos de exposición cortos (Cocozza et al., 2008).

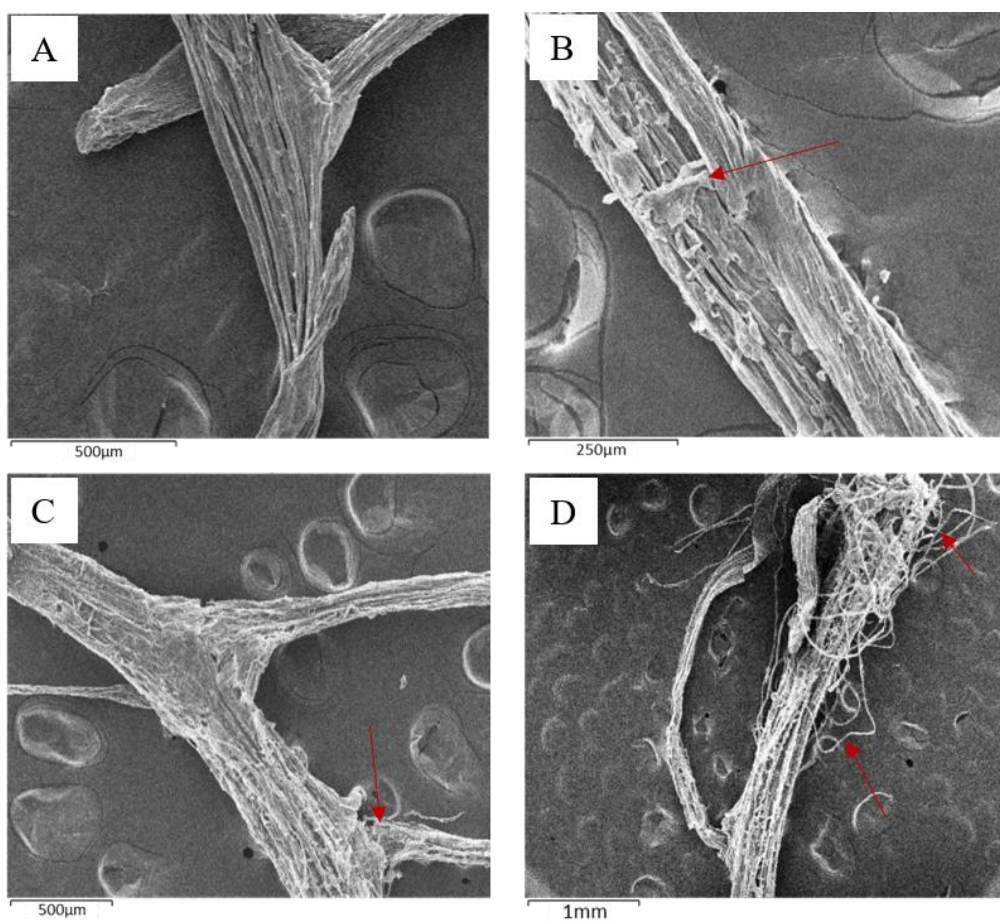


Figura 2. Escaneo de las micrografías electrónicas en raíces de *Phaseolus vulgaris* (A = control; B = $0,25 \mu\text{M}$; C = $0,50 \mu\text{M}$ y D = $1 \mu\text{M}$ de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$). Las imágenes muestran una descamación conforme aumenta la concentración de Cd.

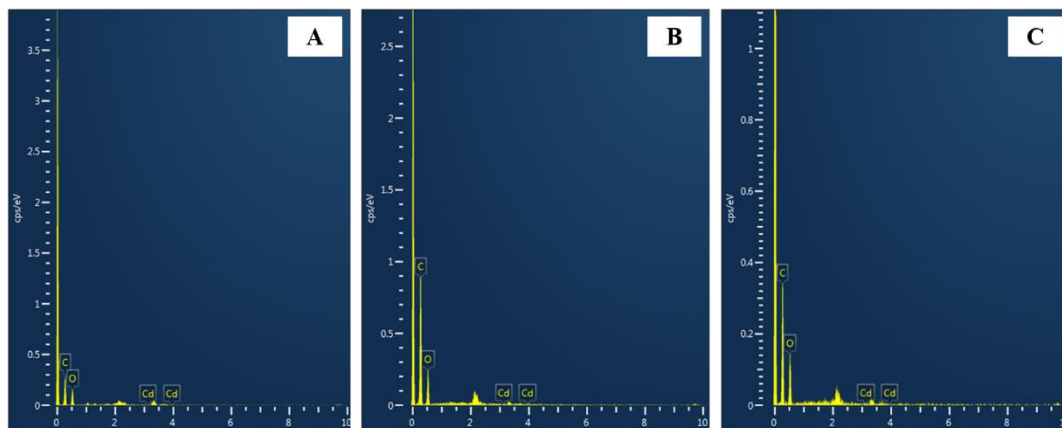


Figura 3. Determinación cualitativa de Cd en raíces de *Phaseolus vulgaris* mediante espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (A = 0,25 μ M; B = 0,50 μ M y C = 1 μ M de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$).

3.3. Contenido de nutrientes

El contenido de Ca en raíces y en vainas de *P. vulgaris* aumentó conforme al incremento de las concentraciones de Cd, la mayor concentración de Ca fue en el tratamiento 1 μ M de Cd. Se observaron diferencias significativas tanto en raíces y el grupo control ($p < 0,001$), en los tratamientos 0,25 μ M y 0,50 μ M ($p < 0,001$), y en vainas con el grupo control ($p = 0,014$). En tallo aumentó significativamente en los tres tratamientos ($p = 0,001$; $p = 0,006$; $p = 0,008$, respectivamente); en hojas aumentó el Ca con la adición de 0,50 μ M sin observarse diferencias significativas ($p = 0,837$) (Figura 4A). En el caso de K, disminuyó en raíz conforme aumentaron las concentraciones de Cd, las hojas tuvieron un comportamiento similar con la adición de 0,25 μ M y 0,50 μ M y un aumento con 1 μ M de Cd. Se observaron diferencias significativas entre el control y los tres tratamientos con Cd ($p < 0,001$) así como entre los tratamientos 0,25 μ M y 0,50 μ M con 1 μ M ($p = 0,020$). De manera contraria, en tallo el K aumentó en cada tratamiento con Cd, existiendo diferencias significativas entre el control y 1 μ M ($p < 0,001$); en vaina la mayor cantidad de K fue con el tratamiento 1 μ M ($p = 0,092$) (Figura 4B). Con relación al Mg, se observó un aumento en raíz, tallo y vaina en los tratamientos con Cd en comparación con el control. En raíz se encontraron diferencias significativas entre el control y la concentración 0,25 μ M ($p = 0,005$), control y 0,50 μ M ($p = 0,047$) y el control y 1 μ M ($p = 0,015$); en tallo estas diferencias tuvieron un valor $p < 0,001$ y en vaina sólo se encontró entre el control y el tratamiento 1 μ M ($p = 0,001$). En hojas no se encontraron diferencias significativas ($p = 0,722$); no obstante, disminuyeron en comparación con el control (Figura 4C). El Fe en la raíz, tallo y vaina no se encontraron diferencias significativas ($p = 0,066$, $p = 0,060$ y $p = 0,073$, respectivamente). En hojas,

el tratamiento control fue significativamente más alto con 1 μ M de Cd ($p = 0,008$) (Figura 4D). El Mn en raíz con 1 μ M fue significativamente mayor en comparación con el control ($p = 0,002$). En tallo no se observan diferencias significativas ($p = 0,726$); en hojas el Mn fue significativamente mayor en comparación con el control ($p < 0,001$) y en vaina no hubo diferencias significativas ($p = 0,081$) (Figura 4E). Con relación al Zn en raíz los tratamientos 0,25 μ M, 0,50 μ M y 1 μ M fueron significativamente mayores ($p = 0,003$, $p = 0,018$ y $0,016$, respectivamente); en el tallo la concentración de Zn fue significativamente mayor en el tratamiento control en comparación con los tres tratamientos con Cd ($p = 0,008$, $p = 0,008$ y $p = 0,047$, respectivamente). En hojas y en vaina no se encontraron diferencias significativas ($p = 0,380$ y $p = 0,218$, respectivamente) (Figura 4F). En la Tabla 2 se puede observar el efecto principal que existió entre los nutrientes y los tratamientos con Cd.

Se ha reportado que la relación del Cd-Ca es antagónica al tener similitudes fisicoquímicas (Xu et al., 2023), ya que el Cd puede ingresar mediante los canales del Ca^{2+} (Qin et al., 2020). El efecto del Cd sobre el Ca es difícil de evaluar ya que con frecuencia se encuentran en competencia por los canales transportadores (Huang et al., 2022). En raíz, hoja y vaina esta competencia no fue observada, esto puede explicarse por el movimiento del Ca restringido por el apoplasto, ruta que es accesible en raíces jóvenes no suberizadas, además de que el Cd puede modificar la estabilidad de los canales del Ca^{2+} e incrementar su flujo dentro de las células. Debido a que el Ca intracelular es un mensajero secundario, puede interactuar para propagar la señal y regular genes involucrados en el transporte, metabolismo y tolerancia a los metales pesados (Sun et al., 2022; Wang et al., 2023).

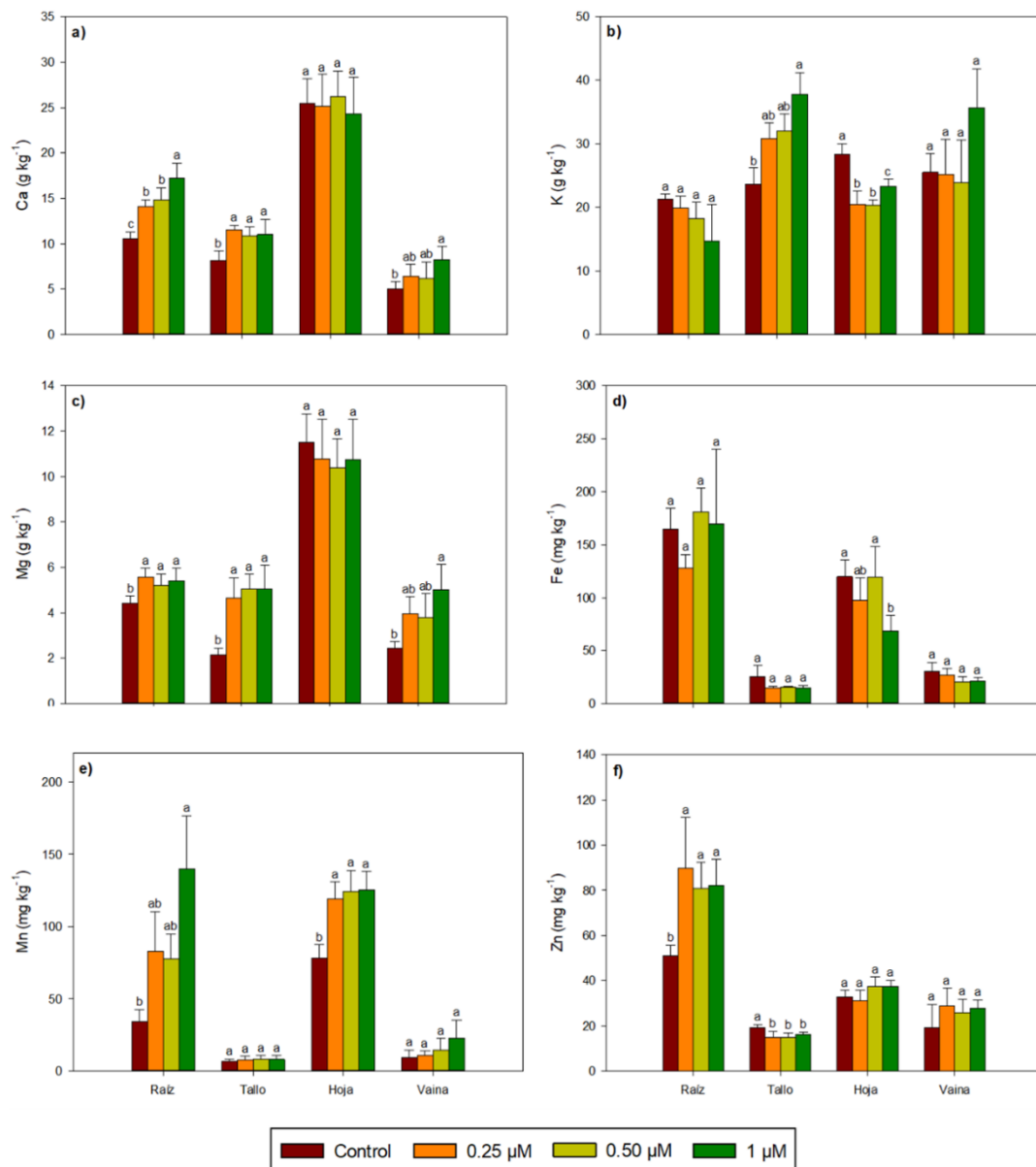


Figura 4. Contenido de nutrientes Ca, K, Mg (g kg⁻¹), Fe, Mn y Zn (mg kg⁻¹) en plantas de *Phaseolus vulgaris* expuestas a cadmio. Los datos se presentan como la media ± DE (n = 5); letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos.

El incremento de Cd en las hojas de *P. vulgaris* pudo ser por los mecanismos de transporte de la raíz a las partes aéreas; ya que el Ca es transportado por el xilema y en plantas que se encuentran en crecimiento se transloca preferentemente en los ápices de las hojas, probablemente generado por el ácido indolacético, además de realizarse un intercambio catiónico y favorecer la translocación del Ca²⁺ hacia las partes aéreas (Zhou et al., 2020). En cuanto a las menores concentraciones en tallo y vaina se puede explicar por la baja translocación del Ca en floema. Por tanto, los órganos que son provistos de nutrientes por medio de la savia en floema son bajos en Ca

(Mengel & Kirkby, 2000). Además, la presencia de Ca puede tener un impacto al disminuir los efectos tóxicos del Cd (Kaleem et al., 2022). En cuanto a nuestros resultados de K en raíz, este nutriente disminuyó y aumentó en tallo. En hoja y vaina disminuyeron con la adición de 0,25 y 0,50 μM, pero aumentaron con 1 μM. Resulta evidente que el Cd interfiere con las concentraciones de K en raíces, se ha sugerido que la inhibición en el contenido de K es consecuencia indirecta del Cd, ya que reduce la disponibilidad de ATP y al no existir similitud química entre estos dos elementos no se justifica una competencia directa.

Tabla 2
Efecto de las concentraciones de Cd en el contenido de macro (g kg⁻¹) y micronutrientes (mg kg⁻¹) en los órganos de *P. vulgaris*

	Raíz		Tallo		Hoja		Vaina		Otros estudios
	Control	Cd	Control	Cd	Control	Cd	Control	Cd	
Ca									
0,25 µM		14,11 ↑		11,55 ↑	25,11 ↓		5,06	6,44 ↑	↑ <i>Amaranthus cruentus</i> (tallos y hojas) con 10 µM (Osmolovskaya et al., 2018).
0,50 µM	10,55	14,83 ↑	8,19	10,84 ↑	26,23 ↑	25,48	5,06	6,21 ↑	↓ <i>Panicum maximum</i> con 2,6 y 5,93 mg kg ⁻¹ (Rabêlo et al., 2022).
1 µM		17,21 ↑		11,03 ↑	24,34 ↓			8,24 ↑	↓ <i>Cucumis sativus</i> (tallos) con 100, 400 y 1000 µM (Gonçalves et al., 2009b).
K									
0,25 µM		19,88 ↓		30,81 ↑	20,51 ↓		25,53	25,23 ↓	↑ <i>P. maximum</i> con 2,6, 5,93 y 10,91 mg kg ⁻¹ de Cd (Rabêlo et al., 2022).
0,50 µM	21,27	18,27 ↓	23,70	32,00 ↑	20,36 ↓	28,37	25,53	23,85 ↑	↓ <i>A. cruentus</i> (raíces) con 10 µM de Cd (Osmolovskaya et al., 2018).
1 µM		14,75 ↓		37,82 ↑	23,33 ↓			35,66 ↑	↓ <i>Sauceda fruticosa</i> (tallos) 400 µM de Cd (Bankaji et al., 2015).
Mg									
0,25 µM		5,57 ↑		4,64 ↑	10,77 ↓		2,44	3,96 ↑	↑ <i>A. cruentus</i> (raíces y hojas) con 10 µM de Cd (Osmolovskaya et al., 2018).
0,50 µM	4,42	5,22 ↑	2,14	5,04 ↑	10,38 ↓	11,48	2,44	3,77 ↑	↑ <i>S. fruticosa</i> (raíces) con 400 µM Cd (Bankaji et al., 2015).
1 µM		5,04 ↑		5,05 ↑	10,75 ↓			5,04 ↑	↓ <i>C. sativus</i> (tallos) con 100, 400 y 1000 µM de Cd (Gonçalves et al., 2009b).
Fe									
0,25 µM		127,89 ↓		14,66 ↓	97,39 ↓		30,47	26,56 ↓	↑ <i>P. maximum</i> con 2,6 mg kg ⁻¹ de Cd (Rabêlo et al., 2022).
0,50 µM	164,80	180,81 ↑	25,47	15,77 ↓	119,35 ↓	119,85	30,47	20,52 ↓	↓ <i>Oryza sativa</i> con (hojas) 1 y 10 µM de Cd (Zhang et al. 2023).
1 µM		169,51 ↑		15,08 ↓	68,56 ↓			21,48 ↓	
Mn									
0,25 µM		82,87 ↑		7,98 ↑	119,19 ↑		9,44	10,68 ↑	↓ <i>P. maximum</i> con 2,6, 5,93 y 10,91 mg kg ⁻¹ de Cd (Rabêlo et al., 2022).
0,50 µM	34,15	77,71 ↑	6,79	8,31 ↑	124,30 ↑	78,00	9,44	14,37 ↑	↓ <i>Oryza sativa</i> (hojas) con 1 y 10 µM de Cd (Zhang et al. 2023).
1 µM		140,05 ↑		8,12 ↑	125,34 ↑			22,65 ↑	
Zn									
0,25 µM		89,63 ↑		15,12 ↓	31,05 ↓			28,73 ↑	↑ <i>P. maximum</i> con 2,6, y 10,91 mg kg ⁻¹ de Cd (Rabêlo et al., 2022).
0,50 µM	51,13	80,76 ↑	19,32	15,06 ↓	37,32 ↑	32,97	19,32	26,03 ↑	↓ <i>C. sativus</i> (tallos) con 100, 400 y 1000 µM de Cd (Gonçalves et al., 2009b)
1 µM		82,13 ↑		16,23 ↓	37,35 ↑			27,77 ↑	<i>Triticum polonicum</i> el Zn inhibe la absorción de Cd en raíces, pero promueve el transporte de Cd en raíces a las partes aéreas (Wang et al., 2017).

La capacidad del K para competir con los cationes divalentes por los sitios de absorción en raíces es débil, por los mecanismos utilizados por las plantas para absorber el K⁺ y Cd²⁺ (Wang et al., 2019). Sin embargo, la relación K-Cd en *Arabidopsis* es antagónica, ayudando a mitigar la afectación en la pared celular, mientras que aumenta el K en raíces (Wu et al., 2020). Los resultados muestran una mayor concentración de K en tallo; sin embargo, a diferencia del estudio realizado por Xu et al. (2018) no hubo una fertilización orgánica. Se ha aceptado que los efectos de los fertilizantes potásicos sobre la migración y transformación de Cd en el sistema suelo-planta depende de los aniones que los acompañan, como Cl, SO₄²⁻ y NO₃⁻ (Bingham et al., 1984; Swedlund et al., 2003; Wang et al., 2019). En plantas de *Triticum aestivum*, *Brassica chinensis* y *O. sativa*, Wang et al. (2019) estudiaron diferentes dosis y tipos de fertilizantes (KCl, K₂SO₄ y KNO₃), en plantas de *T. aestivum* y *B. chinensis* la aplicación de K₂SO₄ aumentó ligeramente el contenido de Cd; sugiriendo que la aplicación de fertilizantes con K generalmente promueve la absorción de Cd; sin embargo, los mecanismos de absorción de las formas químicas del Cd (Cd²⁺ /CdCl⁺ /CdCl₂ /CdSO₄) aún no son claros. Por lo que es recomendable realizar más estudios sobre la interacción K-Cd en relación con la fertilización y formas químicas de Cd. Por otro lado, las concentraciones de Mg aumentaron en raíces, tallo y vainas en los tratamientos con Cd, mientras que en las hojas disminuyó respecto al control. En un genotipo de *Solanum lycopersicum* sensible al estrés por Cd, exhibió concentraciones más altas de Mg en raíces en comparación con el genotipo tolerante (Borges et al., 2019). En raíces de *Oriza sativa* cultivadas hidropónicamente las concentraciones de Mg aumentaron con la adición de 50 µM de Cd (Huybrechts et al., 2021). En hoja, a pesar de no encontrar diferencias significativas se pudo observar una disminución del Mg con 0,25 y 0,50 µM de Cd, lo que pudiera sugerir la activación del mecanismo de defensa en *P. vulgaris*, ya que se ha sugerido que el Mg participa en el mecanismo de tolerancia contra el estrés causado por el Cd (Dražić et al., 2004). En lo que se refiere al Mn, se reporta que la aplicación de este elemento puede disminuir la absorción de Cd (Qin et al., 2020). El Mn absorbido como catión divalente compite con el Cd al compartir las rutas de absorción y transporte (Sasaki et al., 2012). En este estudio en raíz se encontraron diferencias con respecto al control y los tratamientos con Cd, observando un incremento de la concentración de Mn con la adición de 0,25 y 1 µM. Mientras que para hoja y

vaina se observó una mayor concentración de Mn a medida que aumento la concentración de Cd, concordando con Chen et al. (2007) ya que observaron una acumulación sinérgica del Mn con respecto a la acumulación de Cd. Por otro lado, Huang et al. (2020) mencionan que el Fe compite con el Cd mediante las mismas rutas de acceso a las células vegetales, por esto la planta puede tener acceso al Fe y minimizar la absorción de Cd (Mubeen et al., 2023). Kovács et al. (2010) sugieren que el Cd disminuye la capacidad reductora en raíces al disminuir la actividad de la enzima quelato férrico reductasa, lo que concuerda con nuestros resultados al observar una disminución de la concentración de Fe a una concentración de 1 µM. Lo anterior puede ser explicado por la competencia del Fe y el Cd por los mismos sitios de unión en las membranas celulares (Javad et al., 2023). Finalmente, el Zn es un elemento antagónico con el Cd y limita su entrada a las plantas para disminuir la toxicidad por Cd (Qin et al., 2020). Jiang et al. (2023) observaron que Zn disminuye la toxicidad del Cd, teniendo un efecto sinérgico que ayuda a aliviar el estrés por Cd. Dong et al. (2019) mencionan que la relación Cd-Zn puede ser tanto antagónica como sinérgica y dependerá de la especie, tejido, etapa fenológica y concentración del elemento. En este estudio las mayores concentraciones de Zn fueron en raíz, seguido de las partes aéreas como hojas y vainas, lo que concuerda con Cherif et al. (2011) y Wang et al. (2017). Al igual que en este estudio, Sperdoui et al. (2022) observaron que la exposición a Cd mejoró la absorción de Zn, pero disminuyó su translocación en hojas de *Salvia sclarea*. Las mayores concentraciones de Zn encontradas en los diferentes tejidos de *P. vulgaris* concuerdan con un aumento de Cd en los tratamientos 0,25 µM en raíz, 0,50 µM y 1 µM en hoja, y 0,25 µM en vaina, lo cual puede explicarse por el sinergismo Cd-Zn. Resulta evidente que el Cd perturba la nutrición mineral y su absorción se realiza principalmente a través de las raíces y hojas (Lin et al., 2023). Se ha planteado la hipótesis de que los aumentos en las concentraciones de los nutrientes en raíz podrían explicarse parcialmente por la interferencia del Cd, al afectar la permeabilidad de las membranas plasmáticas y sus transportadores específicos (Hédiji et al., 2015; Rivetta et al., 2023). Por lo que, los sinergismos pueden ser un efecto secundario al daño a las membranas celulares por el desbalance de las proporciones de los metales pesados (Rodríguez Ortiz et al., 2009). Asimismo, la alteración en la estructura de la raíz también podría influir en la absorción, translocación y acumulación

de los elementos en los diferentes tejidos y órganos de las plantas. Por lo que estudios futuros deben centrarse en dilucidar los mecanismos y procesos moleculares en respuesta a la estructura de la raíz y los transportadores de membrana en cultivos de *P. vulgaris* que se desarrollan en suelos contaminados con Cd.

4. Conclusiones

El Cd a concentraciones 0,25 y 0,50 μM estimuló la síntesis de clorofila e inhibió la síntesis de carotenoides. Se observaron sinergismos y antagonismos con los nutrientes con los distintos tratamientos de Cd en los diferentes órganos de *P. vulgaris*, ya que se reporta que el Ca y Cd son antagonísticos, en este estudio se observó sinergismo en raíz, tallo y vaina a medida que aumentaron las concentraciones de Cd. De manera similar, el Mg en raíz, tallo y vaina, el Mn en todos los órganos, el Zn en raíz, hoja y vaina fueron sinérgicos con el Cd. De forma contraria el K en raíz y hojas, así como el Fe en tallo, hoja y vaina fueron antagónicos con el Cd. El daño causado en la estructura de la raíz por el Cd pudo influir en la absorción y translocación de los nutrientes en los órganos de *P. vulgaris* pudiendo dañar los transportadores específicos de las membranas celulares.

Estudios futuros deben dilucidar los mecanismos y procesos moleculares en respuesta a la estructura de la raíz y los transportadores de membrana en cultivos de *P. vulgaris* que se desarrollan en suelos contaminados con Cd, y las posibles estrategias para evitar el daño y con ello desarrollar cultivos más resistentes al Cd.


Contribución de los autores

P. B. Gutiérrez-Martínez: metodología, investigación, análisis formal, validación, escritura-borrador. **B. C. Ramírez-Hernández:** metodología, conceptualización, administración de proyecto, adquisición de financiación, escritura-revisión y edición y **M. M. Maldonado-Villegas:** metodología, investigación, recursos, escritura-borrador.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés que pudiera influir en el trabajo presentado en este artículo.

ORCID

P. B. Gutiérrez-Martínez  <https://orcid.org/0000-0002-3684-0576>
 B. C. Ramírez-Hernández  <https://orcid.org/0000-0002-0576-8997>
 M. M. Maldonado-Villegas  <https://orcid.org/0000-0002-0483-6951>

Referencias bibliográficas

An, T., Kuang, Q., Wu, Y., Gao, Y., Zhang, Y., Mickan, B. S., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., Yu, M., & Chen, Y. (2023). Variability in cadmium stress tolerance among four maize genotypes: Impacts on plant physiology, root morphology, and chloroplast microstructure.

Plant Physiology and Biochemistry, 205, 108135. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108135>

Arnon, D. I. (1949). Copper Enzymes in Isolated Chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/2Fpp.24.1.1>

Azizollahi, Z., Ghaderian, S. M., & Ghotbi-Ravandi, A. A. (2019). Cadmium accumulation and its effects on physiological and biochemical characters of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 21(12), 1241-1253. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1619163>

Bankaji, I., Caçador, I., & Sleimi, N. (2015). Physiological and biochemical responses of *Suaeda fruticosa* to cadmium and copper stresses: growth, nutrient uptake, antioxidant enzymes, phytochelatin, and glutathione levels. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 13058-13069. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4414-x>

Baruah, N., Gogoi, N., Roy, S., Bora, P., Chetia, J., Zahra, N., Ali, N., Gogoi, P., & Farooq, M. (2023). Phytotoxic Responses and Plant Tolerance Mechanisms to Cadmium Toxicity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 4805-4826. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01525-8>

Bingham, F. T., Sposito, G., & Strong, J. E. (1984). The effect of chloride on the availability of cadmium. *Journal of Environmental Quality*, 13(1), 71-74. <https://doi.org/10.2134/jeq1984.00472425001300010013x>

Bora, M. S. & Sarma, K. P. (2021). Anatomical and ultrastructural alterations in *Ceratopteris pteridoides* under cadmium stress: A mechanism of cadmium tolerance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 218, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112285>

Borges, K. L. R., Hippler, F. W. R., Carvalho, M. E. A., Nalin, R. S., Matias, F. I. & Azevedo, R. A. (2019). Nutritional status and root morphology of tomato under Cd-induced stress: Comparing contrasting genotypes for metal-tolerance. *Scientia Horticulturae*, 246, 518-527. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.023>

Carvalho, M. E. A., Castro, P. R. C., & Azevedo, R. A. (2020). Hormesis in plants under Cd exposure: From toxic to beneficial element?. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121434>

Chaoui, A., Ghorbal, M. H., & El Ferjani, E. (1997). Effects of cadmium-zinc interactions on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Science*, 126, 21-28. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(97\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(97)00090-3)

Chen, F., Dong, J., Wang, F., Wu, F., Zhang, G., Li, G., Chen, Z., Chen, J., & Wei, K. (2007). Identification of barley genotypes with low grain Cd accumulation and its interaction with four microelements. *Chemosphere*, 67(10), 2082-2088. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.014>

Chen, X., Tao, H., Wu, Y., & Xu, X. (2022). Effects of Cadmium on metabolism of photosynthetic pigment and photosynthetic system in *Lactuca sativa* L. revealed by physiological and proteomics analysis. *Scientia Horticulturae*, 305, 111371. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111371>

Cherif, J., Mediouni, C., Ammar, W. ben, & Jemal, F. (2011). Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Environmental Sciences*, 23(5), 837-844. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60415-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60415-9)

Cocozza, C., Minnocci, A., Tognetti, R., Iori, V., Zucchini, M., Scarascia Mugnozza, G. (2008). Distribution and concentration of cadmium in root tissue of *Populus alba* determined by scanning electron microscopy and energy-dispersive x-ray microanalysis. *iForest*, 1, 96-103.

Dong, Q., Hu, S., Fei, L., Liu, L., & Wang, Z. (2019). Interaction between Cd and Zn on Metal Accumulation, Translocation and Mineral Nutrition in Tall Fescue (*Festuca arundinacea*). *International Journal of Molecular Sciences*, 20(13), 3332. <https://doi.org/10.3390/ijms20133332>

Dražić, G., Mihailović, N., & Stojanović, Z. (2004). Cadmium Toxicity: The effect on Macro- and Micro-Nutrient Contents in Soybean

- Seedlings. *Biologia Plantarum*, 48, 605-607. <https://doi.org/10.1023/B:BIOP.0000047160.79306.b7>
- Escalante Estrada, J. & Kohashi Shibata, J. (1993). *El rendimiento y crecimiento del frijol: manual para la toma de datos*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México.
- Feng, D., Wang, R., Sun, X., Liu, L., Liu, P., Tang, J., Zhang, C., & Liu, H. (2023). Heavy metal stress in plants: Ways to alleviate with exogenous substances. *The Science Of The Total Environment*, 897, 165397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165397>
- Franić, M., Galić, V., Mazur, M., & Šimić, D. (2018). Effects of excess cadmium in soil on JIP-test parameters, hydrogen peroxide content and antioxidant activity in two maize inbreds and their hybrid. *Photosynthetica*, 56(2), 660-669. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0710-7>
- Gonçalves³, J. F., Antes, F. G., Maldaner, J., Pereira, L. B., Tabaldi, L. A., Rauber, R., Rossato, L. V., Bisognin, D. A., Dressler, V. L., De Moraes Flores, É. M., & Nicoloso, F. T. (2009). Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(9), 814-821. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.04.002>
- Gonçalves³, J. F., Nicoloso, F. T., Becker, A. G., Pereira, L. B., Tabaldi, L. A., Cargnelutti, D., De Pelegrin, C. M. G., Dressler, V. L., Da Rocha, J. B. T., & Schetinger, M. R. C. (2009). Photosynthetic pigments content, δ -aminolevulinic acid dehydratase and acid phosphatase activities and mineral nutrients concentration in cadmium-exposed *Cucumis sativus* L. *Biologia*, 64, 310-318. <https://doi.org/10.2478/s11756-009-0034-6>
- Goswami, V., Deepika, S., Diwakar, S. & Kothamasi, D. (2023). Arbuscular mycorrhizas amplify the risk of heavy metal transfer to human food chain from fly ash ameliorated agricultural soils. *Environmental Pollution*, 329, 121733. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121733>
- Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., Dantu, P. K. & Mishra, S. Naeem, M., Ansari, A., Gill, S. (Eds). (2020). Effect of Heavy Metals on Plant Growth: An Overview. En: Contaminants in Agriculture. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_4
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., ... Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Hédjji, H., Djebali, W., Belkadi, A., Cabasson, C., Moing, A., Rolin D., ... Chaibi, W. (2015). Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany*, 97, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.010>
- Huang, X., Duan, S., Wu, Q., Yu, M. & Shabala, S. (2020). Reducing Cadmium Accumulation in Plants: Structure–Function Relations and Tissue-Specific Operation of Transporters in the Spotlight. *Plants*, 9(2), 223. <https://doi.org/10.3390/plants9020223>
- Huang, Y., Chen, J., Sun, Y., Wang, H., Zhan, J., Huang, Y., Zou, J., Wang, L., Su, N., & Cui, J. (2022). Mechanisms of calcium sulfate in alleviating cadmium toxicity and accumulation in pak choi seedlings. *Science of The Total Environment*, 805, 150115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150115>
- Huybrechts, M., Hendrix, S., Kyndt, T., Demeestere, K., Vandamme, D. & Cypers, A. (2021). Short-term effects of cadmium on leaf growth and nutrient transport in rice plants. *Plant Science*, 313, 111054. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111054>
- Javad, S., Maqsood, S., Shah, A. A., Singh, A., Shah, A. N., Nawaz, M., Bashir, M. A., Nashar, E. M., Alghamdi, M. A., FEI-Kott, A., & Mosa, W. F. (2023). Iron nanoparticles mitigates cadmium toxicity in *Triticum aestivum*; Modulation of antioxidative defense system and physiochemical characteristics. *Journal of King Saud University - Science*, 35(3). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102498>
- Jiang, Y., Wei, C., Jiao, Q., Li, G., Alyemeni, M. N., Ahmad, P., Shah, T., Fahad, S., Zhang, J., Zhao, Y., Liu, F., Liu, S., & Liu, H. (2023). Interactive effect of silicon and zinc on cadmium toxicity alleviation in wheat plants. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131933. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131933>
- Kaleem, M., Shabir, F., Hussain, I., Hameed, M., Ahmad, M. S. A., Mehmood, A., Ashfaq, W., Riaz, S., Afzaal, Z., Maqsood, M. F., Iqbal, U., Shah, S. M. R., & 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>
- Kaushik, S., Ranjan, A., Sidhu, A., Singh, A. K. & Sirhindi, G. (2024). Cadmium toxicity: its' uptake and retaliation by plant defence system and ja signaling. *BioMetals*, <https://doi.org/10.1007/s10534-023-00569-8>
- Kisa, D., Öztürk, L. & Tekin, S. (2016). Gene expression analysis of metallothionein and mineral elements uptake in tomato (*Solanum lycopersicum*) exposed to cadmium. *Journal of Plant Research*, 129, 989-995. <https://doi.org/10.1007/s10265-016-0847-7>
- Kovács, K., Kuzmann, E., Vértes, A., Lévai, L., Cseh, E. & Fodor, F. (2010). Effect of cadmium on iron uptake in cucumber roots: A Mössbauer-spectroscopic study. *Plant and Soil* 327, 49-56. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0030-1>
- Lin, L., Wu, X., Deng, X., Lin, Z., Liu, C., Zhang, J., He, T., Yi, Y., Liu, H., Wang, Y., Sun, W., & Xu, Z. (2023). Mechanisms of low cadmium accumulation in crops: A comprehensive overview from rhizosphere soil to edible parts. *Environmental Research*, 245, 118054. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118054>
- Liu, L., Shang, Y. K., Li, L., Chen, Y. H., Qin, Z. Z., Zhou, L. J., Yuan, M., Ding, C. B., Liu, J., Huang, Y., Yang, R. W., Zhou, Y. H., & Liao, J. Q. (2018). Cadmium stress in Dongying wild soybean seedlings: growth, Cd accumulation, and photosynthesis. *Photosynthetica*, 56(4), 1346-1352. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0844-2>
- Mengel, K. & Kirkby, E. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal*. Basilea: Instituto Internacional de la Potasa tra. Edición en español.
- Mubeen, S., Ni, W., He, C. & Yang, Z. (2023). Agricultural Strategies to Reduce Cadmium Accumulation in Crops for Food Safety. *Agriculture*, 13(2), 471. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020471>
- Osmolovskaya, N. G., Dung, V. V., Kudryashova, Z. K., Kuchaeva, L. N. & Popova, N. F. (2018). Effect of Cadmium on Distribution of Potassium, Calcium, Magnesium, and Oxalate Accumulation in *Amaranthus cruentus* L. Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 65, 553-562. <https://doi.org/10.1134/S1021443718040076>
- Qin, S., Liu, H., Nie, Z., Rengel, Z., Gao, W., Li, C. & Zhao, P. (2020). Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Pedosphere*, 30(2), 168-180. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60002-9)
- Rabêlo, F.H.S., dos Santos, F.H., Lavres, J & Alleoni, L.R.F. (2022). Changes in Tillering, Nutritional Status and Biomass Yield of *Panicum maximum* Used for Cadmium Phytoextraction. *Water Air Soil Pollution* 233, 214. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05687-6>
- Rivetta, A., Pesenti, M., Sacchi, G. A., Nocito, F. F. & Cocucci, M. (2023). Cadmium Transport in Maize Root Segments Using a Classical Physiological Approach: Evidence of Influx Largely Exceeding Efflux in Subapical Regions. *Plants*, 12(5), 992. <https://doi.org/10.3390/plants12050992>
- Rodríguez Ortiz, J. C., Valdez Cepeda, R. D., Alcalá Jáuregui J. J. A., García Hernández, L., Rodríguez Fuentes, H., Tapia Goné, J. J., Pérez Moreno, J. A. & Woo Reza, J. L. (2009). Relaciones entre Cd, Pb y elementos esenciales en el proceso de fitoacumulación en *Nicotiana tabacum* L. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(3): 205-211.
- Saleem, M. H., Parveen, A., Perveen, S., Akhtar, N., Abasi, F., Ehsan, M., Ali, H., Okla, M. K., Saleh, I. A., Zomot, N., Alwasel, Y. A., Abdel-Maksoud, M. A., & Fahad, S. (2023). Alleviation of cadmium toxicity in pea (*Pisum sativum* L.) through Zn–Lys supplementation and its effects on growth and antioxidant defense. *Environmental Science and Pollution Research*, <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31874-5>

Sana, S., Ramzan, M., Ejaz, S., Danish, S., Salmen, S. H., & Ansari, M. J. (2024). Differential responses of chili varieties grown under cadmium stress. *BMC Plant Biology*, *24*(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04678-x>

Sardar, R., Ahmed, S., Shah, A. A., & Yasin, N. A. (2022). Selenium nanoparticles reduced cadmium uptake, regulated nutritional homeostasis and antioxidative system in *Coriandrum sativum* grown in cadmium toxic conditions. *Chemosphere*, *287*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132332>

Sasaki, A., Yamaji, N., Yokosho, K., & Ma, J. F. (2012). Nramp5 Is a Major Transporter Responsible for Manganese and Cadmium Uptake in Rice. *Plant Cell*, *24*(5), 2155-67. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.096925>

Schmidt, É C., Scariot, L. A., Rover, T., & Bouzon, Z. L. (2009). Changes in ultrastructure and histochemistry of two red macroalgae strains of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales), as a consequence of ultraviolet B radiation exposure. *Micron*, *40*(8), 860-869. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2009.06.003>

Shah, K., Mankad, A., Reddy, M., & Kuntal Shah, C. (2017). Cadmium accumulation and its effects on growth and biochemical parameters in *Tagetes erecta* L. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *6*(3).

Sperdoui, I., Adamakis, I.-D., Dobrikova, A., Apostolova, E., Hanč, A., & Moustakas, M. (2022). Excess Zinc Supply Reduces Cadmium Uptake and Mitigates Cadmium Toxicity Effects on Chloroplast Structure, Oxidative Stress, and Photosystem II Photochemical Efficiency in *Salvia sclarea* Plants. *Toxics*, *10*(1), 36. <https://doi.org/10.3390/toxics10010036>

Sun, C., Liang, X., Gong, X., Chen, H., Liu, X., Zhang, S., Li, F., Zhao, J., & Yi, J. (2022). Comparative transcriptomics provide new insights into the mechanisms by which foliar silicon alleviates the effects of cadmium exposure in rice. *Journal of Environmental Sciences*, *115*, 294-307. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.07.030>

Sun, H., Wang, X., Shang, Li., Zhou, Z & Wang, R. (2017). Cadmium accumulation and its effects on nutrient uptake and photosynthetic performance in cucumber (*Cucumis sativus* L.). <https://www.researchgate.net/publication/320735530>.

Swedlund, P. J., Webster, J. G. & Miskelly G. M. (2003). The effect of SO₄ on the ferrihydrite adsorption of Co, Pb and Cd: ternary complexes and site heterogeneity. *Applied Geochemistry*, *18*(11), 1617-1689. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(03\)00082-9](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(03)00082-9)

Taiz, L. & Zeiger, E. (2010). *Fisiología vegetal*. Quinta edición, Sinauer Associates Inc., Sunderland, 782 p.

Tang, L., Xiao, L., Chen, E., Lei, X., Ren, J., Yang, Y., Xiao, B., & Gong, C. (2023). Magnesium transporter CsMG1T0 of tea plants plays a key role in chlorosis leaf vein greening. *Plant Physiology and Biochemistry*, *201*, 107842. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107842>

Ukai, Y., Taoka, H., Kamada, M., Wakui, Y., Goto, F., Kitazaki, K., Abe, T., Hokura, A., Yoshihara, T., & Shimada, H. (2023). The cadmium-hypertolerant fern, *Athyrium yokoscense*, exhibits two cadmium stress mitigation strategies in the roots and the aerial parts. *bioRxiv*, *12*, 06, 570362. <https://doi.org/10.1101/2023.12.06.570362>

Wang, K., Fu, G., Yu, Y., Wan, Y., Liu, Z., Wang, Q., Zhang, J., & Li, H. (2019). Effects of different potassium fertilizers on cadmium uptake by three crops. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 27014-27022. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05930-4>

Wang, T., Chen, X., Ju, C. & Wang, C. (2023). Calcium signaling in plant mineral nutrition: From uptake to transport. *Plant Communications*, *4*(6), 100678. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100678>

Wang, Y., Wang, X., Wang, C., Peng, F., Wang, R., Xiao, X., Zeng, J., Kang, H., Fan, X., Sha, L., Zhang, H., & Zhou, Y. (2017). Transcriptomic profiles reveal the interactions of Cd/Zn in dwarf polish wheat (*Triticum polonicum* L.) roots. *Frontiers in Physiology*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00168>

Wu, Q., Zhu, X., Zhao, X. & Shen, R. (2020). Potassium affects cadmium resistance in Arabidopsis through facilitating root cell wall Cd retention in a nitric oxide dependent manner. *Environmental and Experimental Botany*, *178*, 104175. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104175>

Xu, Y., Gui, Y., Zhi, D., Pi, J., Liu, X., Xiang, J., Li, D., & Li, J. (2023). Protective effects of calcium against cadmium-induced toxicity in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *258*, 114972. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114972>

Xu, Y., Tang, H., Liu, T., Li, Y., Huang, X. & Pi, J. (2018). Effects of long-term fertilization practices on heavy metal cadmium accumulation in the surface soil and rice plants of double-cropping rice system in Southern China. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 19836-19844. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2175-z>

Yang, L., Kang, Y., Li, N., Wang, Y., Mou, H., Sun, H., Ao, T., Chen, L., & Chen, W. (2024). Unlocking hormesis and toxic effects induced by cadmium in *Polygonatum cyrtoneuma* Hua based on morphology, physiology and metabolomics. *Journal of Hazardous Materials*, *465*, 133447. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133447>

Yerlikaya Anli, R., Akşahin, V., Dündar, Ş. & Ahmet, N. A. S. E. (2022). Cadmium pollution impairs maize growth and uptake of cationic essential nutrients. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, *6*(1), 144-153. <https://doi.org/10.46291/ISPECJASvol6iss1pp144-153>

Zaid, A., Mohammad, F. & Fariduddin, Q. (2020). Plant growth regulators improve growth, photosynthesis, mineral nutrient and antioxidant system under cadmium stress in menthol mint (*Mentha arvensis* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *26*, 25-39. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00715-y>

Zhang, Q., Wen, Q., Ma, T., Zhu, Q., Huang, D., Zhu, H., Xu, C., & Chen, H. (2023). Cadmium-induced iron deficiency is a compromise strategy to reduce Cd uptake in rice. *Environmental and Experimental Botany*, *206*, 105155. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105155>

Zhao, H., Guan, J., Liang, Q., Zhang, X., Hu, H. & Zhang, J. (2021). Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of saffras seedlings. *Scientific Reports*, *11*, 9913. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-89322-0>

Zhou, J., Cheng, K., Huang, G., Chen, G., Zhou, S., Huang, Y., Zhang, J., Duan, H., & Fan, H. (2020). Effects of exogenous 3-indoleacetic acid and cadmium stress on the physiological and biochemical characteristics of *Cinnamomum camphora*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *191*, 109998. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109998>

Anexo

Tabla A1

Análisis químico del agua empleada para la preparación de la solución nutritiva

pH	CE	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	Σ (-)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ (+)
	dS m ⁻¹	----- meq L ⁻¹ -----					----- meq L ⁻¹ -----				
6,65	0,07	0	0,36	0,17	0,07	0,60	0,14	0,07	0,39	0,07	0,67