



Influencia del cadmio en el crecimiento vegetativo y contenido de clorofila en plántulas del género *Theobroma* en San Martín

Influence of cadmium on vegetative growth and chlorophyll content in seedlings of the genus *Theobroma* in San Martín

García-Vallejos, Mairan Noelia^{1*}

Vallejos-Torres, Geomar¹

¹Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

Recibido: 02 Feb. 2026 | **Aceptado:** 14 Mar. 2026 | **Publicado:** 20 Jul. 2026

Autor de correspondencia*: mngarciav@alumno.unsm.edu.pe

Cómo citar este artículo: García-Vallejos, M. N. & Vallejos-Torres, G. (2026). Influencia del cadmio en el crecimiento vegetativo y contenido de clorofila en plántulas del género *Theobroma* en San Martín. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 6(2), e1514.

<https://doi.org/10.51252/raa.v6i2.1514>

RESUMEN

El género *Theobroma* es de gran importancia en San Martín, pero enfrenta desafíos como la contaminación por cadmio (cd). Esta investigación determinó cómo diferentes concentraciones afectan la altura, diámetro, longitud de raíces y número de hojas en *Theobroma cacao*, *T. bicolor*, *T. Grandiflorum*. Los resultados indicaron que el cadmio afecta negativamente el crecimiento morfológico, siendo *T. Grandiflorum* la especie más afectada, con una reducción del 15% en altura bajo 5ppm. En *T. cacao*, la longitud disminuyó significativamente de 41 cm a 27 cm. Por el contrario, *T. bicolor* mostró mayor resistencia, con solo 8% de reducción en el número de hojas. En cuanto a la biomasa seca, *T. bicolor* presentó una reducción del 20% mientras que *T. cacao* disminuyó un 25% bajo 3 y 5 ppm. Respecto a la clorofila, aunque no hubo diferencias estadísticas significativas, se observó una tendencia decreciente en las tres especies. En conclusión, las especies de *Theobroma* poseen ciertas tolerancias, pero el cadmio impacta con mayor evidencia en el crecimiento y la biomasa. Este análisis es relevante para el manejo de suelos contaminados en cultivos de cacao.

Palabras clave: cadmio; *Theobroma*; *T. bicolor*; *T. cacao*; *T. Grandiflorum*

ABSTRACT

The genus *Theobroma* is of great importance in San Martín, but it faces challenges such as cadmium (Cd) contamination. This research determined how different concentrations affect the height, diameter, root length, and number of leaves in *Theobroma cacao*, *T. bicolor*, and *T. grandiflorum*. The results indicated that cadmium negatively affects morphological growth, with *T. Grandiflorum* being the most affected species, showing a 15% reduction in height at 5 ppm. In *T. cacao*, the length decreased significantly from 41 cm to 27 cm. In contrast, *T. bicolor* showed greater resistance, with only an 8% reduction in the number of leaves. Regarding dry biomass, *T. bicolor* showed a 20% reduction, while *T. cacao* decreased by 25% at 3 and 5 ppm. With respect to chlorophyll, although there were no statistically significant differences, a decreasing trend was observed in all three species. In conclusion, *Theobroma* species exhibit some tolerance, but cadmium has the most significant impact on growth and biomass. This analysis is relevant for managing contaminated soils in cacao cultivation.

Keywords: cadmium; *Theobroma*; *T. bicolor*; *T. cocoa*; *T. Grandiflorum*



1. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) se ha convertido en uno de los cultivos de mayor relevancia económica en el Perú, especialmente para pobladores de medianos y bajos ingresos, debido al sustento financiero que proporciona. En la región de San Martín, este cultivo ocupa el 37,5 % del área sembrada de T. cacao a nivel nacional (Vallejos-Torres et al., 2021). No obstante, el incremento de las áreas de cultivo ha traído consigo un problema ambiental significativo: la contaminación de los suelos con metales pesados, especialmente cadmio (Cd), lo que plantea un reto importante para la producción sostenible de T. cacao en esta región.

El cadmio es un metal tóxico que, al acumularse en el suelo y en los tejidos de las plantas, afecta negativamente el crecimiento, la fotosíntesis, el contenido de clorofila y la absorción de nutrientes, entre otros procesos fisiológicos esenciales en las plantas (Farooq et al., 2016; Pereira de Araújo et al., 2017). Diversas fuentes, como las actividades humanas, residuos industriales, prácticas agronómicas inapropiadas y la emisión de gases vehiculares contribuyen a la presencia de Cd en el ambiente (Aikpokpodion et al., 2012). Este metal ha sido identificado como un contaminante crítico en los cultivos de T. cacao en América Latina, incluida la región de San Martín, y su acumulación en el producto final ha generado restricciones para la exportación de T. cacao, especialmente en mercados exigentes como la Unión Europea (Primost et al., 2017).

A nivel genético, se ha comprobado que los portainjertos y patrones empleados para la propagación del T. cacao, especialmente el cacao criollo, muestran una respuesta variable ante la presencia de Cd en el suelo (Ribeiro et al., 2016; Ríos Vega, 1957). Si bien los patrones criollos han sido ampliamente utilizados en regiones tropicales, la investigación sobre su eficacia en la acumulación de Cd y su impacto en características agronómicas clave, como el crecimiento vegetativo y el contenido de clorofila, es limitada (Asman et al., 2021; YIN, 2004). Estudios recientes sugieren que es posible reducir la absorción de Cd a través del uso de portainjertos que presenten baja capacidad de absorción del metal, sin embargo, esto aún no ha sido comprobado experimentalmente en el T. cacao (Engbersen et al., 2019; Lewis et al., 2018).

El contenido de Cd en los productos de T. cacao limita su aceptación en el mercado internacional, ya que este metal pesado es un riesgo potencial para la salud al acumularse en el organismo humano (Bali et al., 2020). La región de San Martín ha reportado concentraciones significativas de Cd en los granos de T. cacao, lo que restringe la comercialización en mercados regulados como la UE, que a partir de 2019 impuso límites máximos de Cd en productos de T. cacao (Chavez et al., 2015; Zug et al., 2019). La hipótesis del estudio es que al menos una especie del género *Theobroma* mostrará mayor tolerancia al cadmio, evidenciada en un crecimiento vegetativo más robusto y un mayor contenido de clorofila.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Área de estudio

La presente investigación se realizó en el vivero de Tejidos vegetales de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto, distrito de Morales, provincia y región de San Martín, entre julio y diciembre de 2022. Para su ejecución no se requirieron autorizaciones o permisos específicos, debido a que las actividades desarrolladas no implicaron riesgos para el medio ambiente ni para la salud de las personas. Sin embargo, se cumplieron los controles ambientales y protocolos de bioseguridad necesarios para garantizar un adecuado desarrollo del estudio. En cuanto a los principios éticos internacionales, estos no fueron aplicables por la naturaleza de la investigación. El sistema de variables estuvo conformado por variables principales, entre ellas la concentración de cadmio en suelos y tallos, altura, diámetro de tallo, área foliar, biomasa radicular y contenido de clorofila en hojas. Asimismo, se consideraron variables secundarias relacionadas con parámetros ambientales y climáticos, propiedades fisicoquímicas del suelo, condiciones de control experimental y constantes estadísticas. Finalmente, los

procedimientos de la investigación estuvieron orientados a determinar la absorción de cadmio en plántulas de especies del género *Theobroma*.

Colecta y preparación del suelo

El suelo empleado en el estudio fue recolectado en el fundo Aucaloma y sometido a un proceso riguroso de preparación. En primer lugar, se dejó secar al aire libre a temperatura ambiente para reducir su contenido de humedad. Luego, se tamizó utilizando una malla de 2 mm con el objetivo de remover partículas y residuos indeseados. Posteriormente, se esterilizó en autoclave a 121 °C durante 60 minutos. Una vez concluida la esterilización, el suelo se dejó secar nuevamente a temperatura ambiente durante tres días para estabilizar sus condiciones (Figura).



Figura 1. Preparación del sustrato para el experimento. A. Tamizado del suelo. B. Llenado del suelo en bolsas polipropileno. C. Bolsas con sustrato listas para esterilizar en autoclave. D. Inicio del proceso de esterilización. E. Sustrato esterilizado. F. Arena esterilizada

Dosificación de Cadmio

La dosificación de cadmio en el suelo esterilizado se realizó en concentraciones de 1, 3 y 5 ppm ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Para preparar estas concentraciones, se utilizó una solución madre de cadmio, aplicando la fórmula de dilución $C1 * V1 = C2 * V2$. El sustrato utilizado estuvo compuesto por una mezcla de suelo de campo y arena en una proporción 2:1, este se mezclaron las soluciones correspondientes en bolsas de polipropileno, asegurando una distribución uniforme del contaminante mediante agitación periódica durante un período de 30 días, siguiendo el protocolo descrito por Tziourrou et al. (2026).

Germinación de plantas de *Theobroma*

Diez días antes de culminar el período de homogenización del cadmio en el sustrato, se procedió a la germinación de semillas de tres especies del género *Theobroma*: *Theobroma cacao* L. (cacao), *Theobroma bicolor* (macambo) y *Theobroma grandiflorum* (copoazú). Las semillas se desinfectaron sumergiéndolas en una solución de hipoclorito de sodio al 5 % durante cinco minutos, seguido de un enjuague con agua estéril. Posteriormente, se sembraron en arena previamente esterilizada en autoclave a 121°C durante 60 minutos. Este proceso aseguró condiciones óptimas para la germinación inicial de las semillas (Figura y Figura).



Figura 2. Mazorcas del género *Theobroma*. A. *Theobroma bicolor* (macambo). B. *Theobroma cacao* L. (cacao). C. *Theobroma grandiflorum* (copoazu)



Figura 3. Proceso germinativo de semillas. A. *Theobroma T. cacao* L. (T. cacao). B. *Theobroma T. bicolor* (macambo). C. *Theobroma T. grandiflorum* (copoazu)

Trasplante de plantas

A los siete días de germinación, las plántulas uniformes se trasplantaron a maceteros individuales con capacidad de tres kilogramos. Cada macetero contenía el sustrato previamente preparado, que consistía en la mezcla de suelo esterilizado, arena y las respectivas concentraciones de cadmio. Durante esta etapa, las plántulas se mantuvieron bajo condiciones de sombra, siguiendo el protocolo establecido por Palencia et al. (2009). Este diseño experimental permitió evaluar el efecto de las diferentes dosis de cadmio en el desarrollo de las plántulas de *Theobroma*.

Recolección y análisis de muestras de suelo

Se recolectaron muestras de suelo de cada maceta para llevar a cabo un análisis detallado de la concentración de cadmio presente. El método empleado para la extracción y cuantificación del cadmio en el suelo fue el protocolo de la EPA 3050B, un método reconocido para la digestión ácida de muestras de suelo que permite evaluar metales pesados como el cadmio.

Extracción y análisis de raíces y tallos

Adicionalmente, se extrajeron cuidadosamente la raíz y tallo de cada planta. Estas muestras vegetales fueron preparadas para el análisis de cadmio, utilizando un proceso de digestión con ácido nítrico (HNO_3), un método adecuado para la descomposición de tejidos vegetales y la posterior liberación de metales. La concentración de cadmio en raíces y tallos se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica, una técnica analítica que permite medir con alta precisión la presencia de metales en bajas concentraciones (Jinxiu et al., 2020).

Diseño estadístico y análisis de dato

Se utilizó un diseño completamente al azar de dos factores (3×4) con seis repeticiones. El primer factor incluyó tres especies de *Theobroma* (*T. cacao*, *T. bicolor*, *T. grandiflorum*); el segundo factor fue la adición de Cd al suelo (0, 1, 3 y 5 mg kg^{-1}), con un total de 72 unidades experimentales y 12 tratamientos. Las variables se analizaron mediante un análisis de varianza de dos vías, seguido de la prueba de rango de Tukey para comparaciones post-hoc. Los análisis estadísticos se realizaron usando el software R (versión 4.0.2).

Tabla 1. Factor, dosis y tratamientos utilizados en la investigación

Factor	Dosis	Tratamientos- Combinación
Factor A: Theobromas	<i>T. Grandiflorum</i>	T1= <i>T. grandiflorum</i> + 0ppm Cd
	<i>T. Cacao</i>	T2= <i>T. grandiflorum</i> + 1ppm Cd
	<i>T. Bicolor</i>	T3= <i>T. grandiflorum</i> + 3ppm Cd
		T4= <i>T. grandiflorum</i> + 5ppm Cd
		T5= <i>T. cacao</i> + 0pm Cd
		T6= <i>T. cacao</i> + 1ppm Cd
		T7= <i>T. cacao</i> + 3ppm Cd
		T8= <i>T. cacao</i> + 5ppm Cd
Factor B:	0 ppm	T9= <i>T. bicolor</i> + 0ppm Cd
Dosis de Cd	1 ppm	T10= <i>T. bicolor</i> + 1ppm Cd
	3 ppm	T11= <i>T. bicolor</i> + 3ppm Cd
	5 ppm	T12= <i>T. bicolor</i> + 5ppm Cd

Tipo y nivel de investigación

La investigación desarrollada es del tipo Aplicada, ya que busca generar conocimiento útil y directamente aplicable para abordar un problema ambiental/agronómico concreto: la influencia del cadmio en el desarrollo de especies de *Theobroma*. y también es una investigación Experimental, puesto que hay manipulación intencional del factor independiente (concentraciones de cadmio) para observar su efecto sobre las variables dependientes (crecimiento, biomasa, absorción, clorofila, etc.).

El nivel de investigación es explicativo, ya que tiene como propósito explicar cómo y por qué las concentraciones de cadmio afectan variables fisiológicas y morfológicas en *Theobroma* spp.. Se emplean pruebas estadísticas para validar la relación causa-efecto, lo cual es característico del nivel explicativo.

Los tratamientos establecidos fueron: *T. grandiflorum*: 0ppm, *T. grandiflorum*: 1ppm *T. grandiflorum*: 3ppm, *T. grandiflorum*: 5ppm, *T. cacao*: 0ppm, *T. cacao*: 1ppm, *T. cacao* :3ppm, *T. cacao*: 5ppm, *T. bicolor*:

0ppm, *T. bicolor*: 1ppm, *T. bicolor*: 3ppm, *T. bicolor*: 5ppm. Determinar el crecimiento vegetativo de tres especies del género *Theobroma* en suelos contaminados con cadmio.

Altura de las plántulas

La altura de cada plántula fue medida desde la base del tallo hasta la punta de la hoja más alta, para la evaluación de esta variable se utilizó una regla. Este registro de altura proporcionó un indicador clave del crecimiento y vigor de las plántulas en respuesta a las condiciones experimentales y posibles variaciones en la absorción de cadmio (Del Aguila et al., 2018).

Evaluación de diámetro de las plántulas

El diámetro del tallo se midió con un vernier digital de alta precisión, tomando la medición a 1 cm por encima de la base del tallo. Este parámetro permitió evaluar el desarrollo estructural de las plántulas, reflejando la capacidad de la planta para soportar el estrés ambiental, incluyendo la toxicidad por cadmio. Las mediciones se realizaron a intervalos regulares durante todo el experimento (Figura 4).

Evaluación del área foliar

El área foliar se determinó utilizando papel milimetrado para medir las dimensiones de las hojas. Las hojas fueron recolectadas y colocadas sobre una hoja de papel milimetrado, asegurándose de que estuvieran completamente extendidas. Posteriormente, se trazaron los contornos de las hojas en el papel y se calcularon las áreas mediante la medición de los segmentos correspondientes en el papel milimetrado. Este método permitió obtener una estimación precisa del área foliar, lo que proporcionó información sobre la capacidad fotosintética y el estado general de las plántulas bajo condiciones de estrés por cadmio.

Evaluación de la biomasa radicular seca

Las raíces fueron cuidadosamente extraídas del sustrato, lavadas con agua destilada para eliminar residuos de suelo y secadas con papel absorbente. Posteriormente, las raíces se colocaron en una estufa de secado a 70 °C durante 72 horas hasta alcanzar peso constante. La biomasa radicular seca fue medida utilizando una balanza analítica de precisión. Este análisis permitió evaluar el desarrollo subterráneo de las plántulas y su capacidad para adaptarse a la absorción de nutrientes y metales pesados.

Analizar el efecto del cadmio en el contenido de clorofila de tres especies del género *Theobroma*. El contenido de clorofila en las hojas de las tres especies del género *Theobroma* se determinó utilizando un medidor portátil de clorofila SPAD (Soil and Plant Analysis Development). Este dispositivo permitió realizar mediciones no destructivas del contenido relativo de clorofila en el tejido foliar, proporcionando datos precisos y rápidos sobre el estado fisiológico de las plantas. Se seleccionaron hojas completamente desarrolladas y saludables, evitando aquellas con signos visibles de daño o enfermedad. Las mediciones se realizaron en tres puntos diferentes de la misma hoja (base, medio y ápice), asegurando un promedio representativo. El dispositivo fue calibrado previamente según las instrucciones del fabricante. Para cada punto de medición, se colocó la hoja entre las pinzas del medidor, y se registró el valor SPAD correspondiente.

El contenido relativo de clorofila, indicado por los valores SPAD, se utilizó como un indicador clave de la capacidad fotosintética y el estado fisiológico de las plantas. La exposición al cadmio puede generar estrés oxidativo en las plantas, lo que impacta negativamente en la síntesis de clorofila y, por ende, en la eficiencia fotosintética.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinar la absorción del cadmio en plántulas de las especies de *Theobroma*

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del cadmio en plántulas de tres especies del género *Theobroma*; *Theobroma cacao* L. (cacao), *Theobroma bicolor* (macambo) y *Theobroma grandiflorum* (copoazú). Es importante mencionar que el porcentaje de germinación alcanzado por cada especie fue más del 80 % siendo: *Theobroma cacao* L. – 82 % *Theobroma bicolor* – 85 % y *Theobroma grandiflorum* 83 %.

Al finalizar el experimento, se llevó a cabo un análisis de la concentración de cadmio en el suelo y en los brotes con el fin de identificar posibles diferencias significativas entre las especies mencionadas. Para este propósito, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) en ambos casos, evaluando el efecto de diferentes concentraciones de cadmio y la respuesta de cada especie.

Concentración de cadmio en el suelo

El análisis de varianza (ANOVA) para la concentración de cadmio (Cd) en el suelo al finalizar el experimento (Tabla 2) mostró que la dosis de Cd aplicada tuvo un efecto altamente significativo en la acumulación de este metal en el suelo ($F = 616,823$, $p < 0,0001$). Esto valida la hipótesis inicial de que un aumento en la dosis de cadmio incrementa su concentración en el suelo. Asimismo, la variable "Especie" resultó significativa ($F = 7,181$, $p = 0,0036$), evidenciando que las especies del género *Theobroma* presentan diferencias en la acumulación de cadmio en el suelo.

Tabla 2. Análisis ANOVA de concentración de Cd en el suelo

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P valor
Cadmio	3	1,4495	0,4832	616,823	< 0,0001 ***
Especie	2	0,0113	0,0056	7,181	0,0036 **
Cadmio: Especie	6	0,017	0,0028	3,621	0,0106 *
Error	24	0,0188	0,0008		

La interacción entre "Cadmio" y "Especie" fue significativa ($F = 3,621$, $p = 0,0106$), lo que indica que el efecto del cadmio depende de la especie estudiada. Los análisis post-hoc (Tabla 3) revelaron que *Theobroma grandiflorum* a 5 ppm presentó la mayor acumulación de cadmio en el suelo (0,57 ppm, grupo a), mientras que *T. cacao* a la misma dosis acumuló menos (0,5 ppm, grupo ab). Por otro lado, *T. bicolor* y las concentraciones más bajas de Cd se ubicaron en grupos inferiores, destacando diferencias entre las especies y las dosis aplicadas.

Tabla 3. Análisis post-hoc (Tukey) de cadmio en suelo

Tratamiento	Media	Grupo
T. grandiflorum: 5ppm	0,57	a
T. cacao: 5ppm	0,5	ab
T. bicolor: 5ppm	0,45	bc
T. bicolor: 3ppm	0,45	bc
T. grandiflorum: 3ppm	0,45	cb
T. grandiflorum: 1ppm	0,45	bc
T. bicolor: 1ppm	0,42	bc
T. cacao: 3ppm	0,42	bc
T. cacao: 1ppm	0,4	c
T. bicolor: 0ppm	0	d
T. cacao: 0ppm	0	d
T. grandiflorum: 0ppm	0	d

Nuestros resultados coinciden parcialmente con estudios previos en *T. cacao*, que reportaron una menor acumulación de Cd en el suelo en comparación con otras especies vegetales, debido a mecanismos específicos de translocación y almacenamiento del metal (Pérez Moncada et al., 2019). Sin embargo, la

tendencia observada en *T. grandiflorum*, con mayor acumulación de Cd en el suelo, no ha sido reportada previamente, indicando diferencias fisiológicas que requieren más investigación.

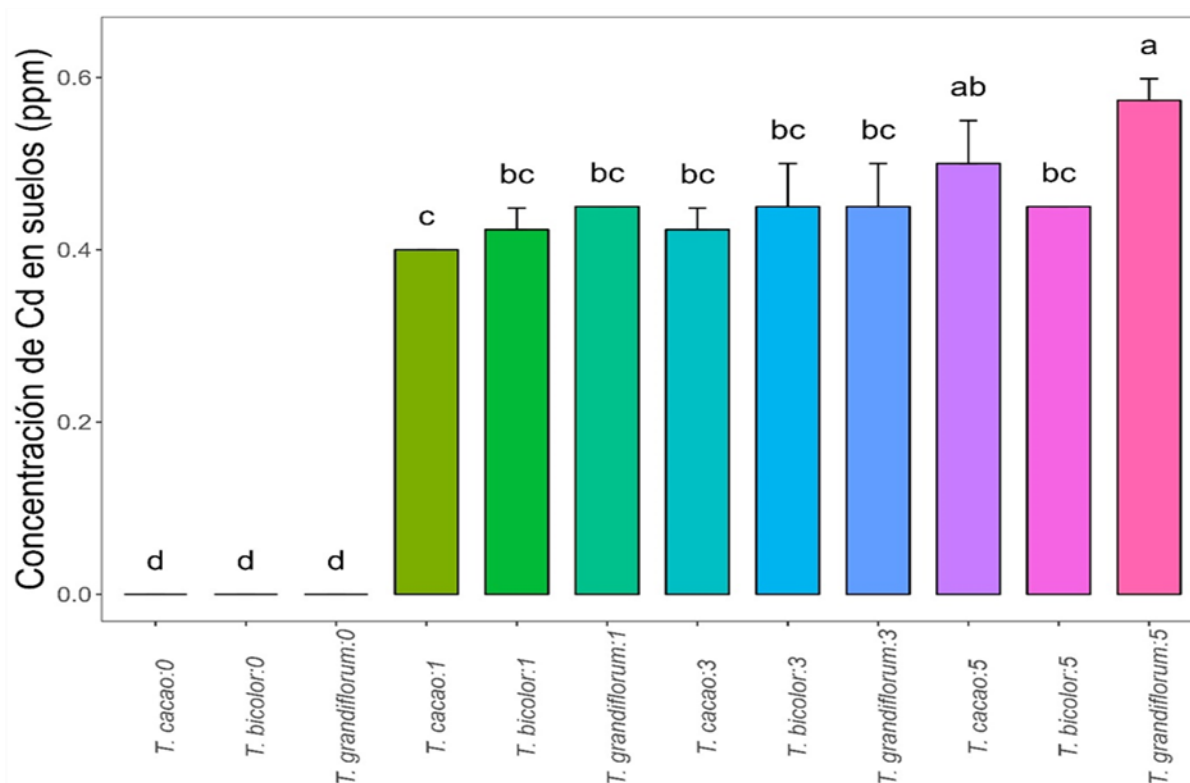


Figura 4. Concentración final de Cd en suelo. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos después de la prueba de Tukey ($p < 0,05$)

Los resultados del ANOVA muestran que el cadmio tiene un efecto significativo en la altura de los brotes ($F = 15,368$, $p = 0,000196$), lo que concuerda con lo reportado por Solís Domínguez et al. (2007) y Sánchez-Pardo et al. (2013) quienes destacaron que el Cd afecta el crecimiento de las plantas al alcanzar niveles tóxicos en sus tejidos. En este estudio, las concentraciones más altas de Cd (5 ppm) redujeron la altura promedio de los brotes en todas las especies de *Theobroma*, con diferencias significativas respecto a la condición sin Cd (0 ppm). La especie también tiene un efecto significativo ($F = 12,446$, $p < 0,0001$), y la interacción entre especie y cadmio ($F = 3,998$, $p = 0,006487$) indica que la sensibilidad al Cd varía entre especies. Por ejemplo, *Theobroma cacao* L. presentó el mayor crecimiento en ausencia de Cd (0 ppm, 41,56 cm, grupo a), pero fue más sensible a las concentraciones crecientes de este metal, con una disminución pronunciada en la altura promedio a 5 ppm (29,38 cm, grupo b). Esto contrasta con *T. bicolor* y *T. grandiflorum*, cuyos crecimientos fueron más estables, aunque consistentemente más bajos, bajo las mismas condiciones. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Correa et al. (2021), quienes demostraron que, a pH mayor a 5, el Cd en concentraciones de hasta 10 ppm no afecta significativamente el crecimiento en altura o diámetro del tallo en *T. cacao*. Sin embargo, a $pH < 5$, concentraciones de Cd de 5-10 ppm reducen significativamente el crecimiento, y niveles de 20 ppm pueden ser letales. En este estudio, la reducción de altura a partir de 3 ppm de Cd en *T. cacao* refuerza la idea de que esta especie es más susceptible al estrés por Cd, particularmente cuando las condiciones del suelo no amortiguan su disponibilidad, como en un pH ácido.

A nivel fisiológico, la reducción de la altura en *T. cacao* y, en menor grado, en *T. bicolor* y *T. grandiflorum*, podría estar relacionada con la interrupción del metabolismo y la disponibilidad de nutrientes esenciales debido a niveles excesivos de Cd, como lo sugieren Sandalio et al. (2001) y Chen et al. (2011).

Finalmente, los datos de este estudio resaltan la importancia de las características genotípicas en la tolerancia al Cd, lo cual es congruente con la literatura previa. La respuesta diferencial entre especies y

concentraciones de Cd evidencia la necesidad de seleccionar genotipos específicos de *Theobroma* que sean menos sensibles al Cd en zonas donde este metal constituye un problema ambiental, como se plantea en investigaciones sobre seguridad alimentaria en el T. cacao.

Diámetro

Según el resultado del ANOVA (Tabla 4), el factor Cadmio tiene un efecto significativo en el diámetro de los brotes, con un valor de $F = 9,706$ y $p = 0,000223$. Esto indica que las distintas concentraciones de cadmio afectan significativamente el diámetro de los brotes, posiblemente reduciendo su grosor debido al estrés por cadmio. El factor Especie muestra un efecto altamente significativo sobre el diámetro ($F = 105,708$, $p = 1,26 \times 10^{-12}$). Esto sugiere que existen diferencias importantes en el grosor de los brotes entre las diferentes especies de *Theobroma*, lo cual puede estar asociado con características estructurales propias de cada especie.

Tabla 4. Análisis ANOVA de concentración de Cd en diámetro

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P valor
Cadmio	3	1,816	0,605	9,706	0,000223 ***
Especie	2	13,182	6,591	105,708	1,26e-12 ***
Cadmio: Especie	6	2,371	0,395	6,339	0,000424 ***
Error	24	1,496	0,062		

En la comparación de medias (Tabla 5), los tratamientos están agrupados en diferentes letras para indicar las diferencias significativas en el diámetro de los brotes, 0 ppm en *T. bicolor* tiene el mayor diámetro promedio (4,08 mm) y se encuentra en el grupo a, sugiriendo que, en ausencia de cadmio, esta especie desarrolla un grosor mayor. 1 ppm en *T. cacao* (3,9 mm) y 0 ppm en *T. cacao* (3,61 mm) están en el grupo ab y abc, respectivamente, indicando que *T. cacao* también alcanza diámetros elevados sin cadmio o con bajas concentraciones. A medida que aumenta la concentración de cadmio, el diámetro tiende a disminuir, especialmente en *T. grandiflorum*, que presenta los diámetros más bajos en 0 ppm y en concentraciones de 3 ppm y 5 ppm (grupos de y e).

Tabla 5. Análisis post-hoc (Tukey) de cadmio en diámetro

Tratamiento	Media	Grupo
0ppm: <i>T. bicolor</i>	4,08	a
1ppm: <i>T. cacao</i>	3,9	ab
0ppm: <i>T. cacao</i>	3,61	abc
5ppm: <i>T. cacao</i>	3,31	bc
5ppm: <i>T. bicolor</i>	3,2	bc
3ppm: <i>T. cacao</i>	3,09	cd
1ppm: <i>T. bicolor</i>	3,02	cd
3ppm: <i>T. bicolor</i>	2,9	cd
5ppm: <i>T. grandiflorum</i>	2,42	de
0ppm: <i>T. grandiflorum</i>	2,16	e
3ppm: <i>T. grandiflorum</i>	1,95	e
1ppm: <i>T. grandiflorum</i>	1,92	e

Según el análisis ANOVA (Tabla 6), el factor Cadmio tiene un efecto significativo en el área foliar, con un valor de $F = 8,271$ y $p = 0,000594$. Esto indica que las distintas concentraciones de cadmio afectan significativamente el área foliar, probablemente debido al efecto tóxico del cadmio que limita el desarrollo de las hojas. El factor Especie muestra un efecto altamente significativo sobre el área foliar ($F = 25,809$, $p = 1,04 \times 10^{-6}$). Esto sugiere que existen diferencias importantes en el área foliar entre las distintas especies de *Theobroma*, reflejando una variabilidad genética que influye en el tamaño de las hojas. La interacción entre Cadmio y Especie también es significativa ($F = 2,975$, $p = 0,025703$), lo cual indica que el efecto del cadmio sobre el área foliar varía entre especies. Esto significa que cada especie responde de manera diferente a las concentraciones de cadmio en términos de desarrollo foliar.

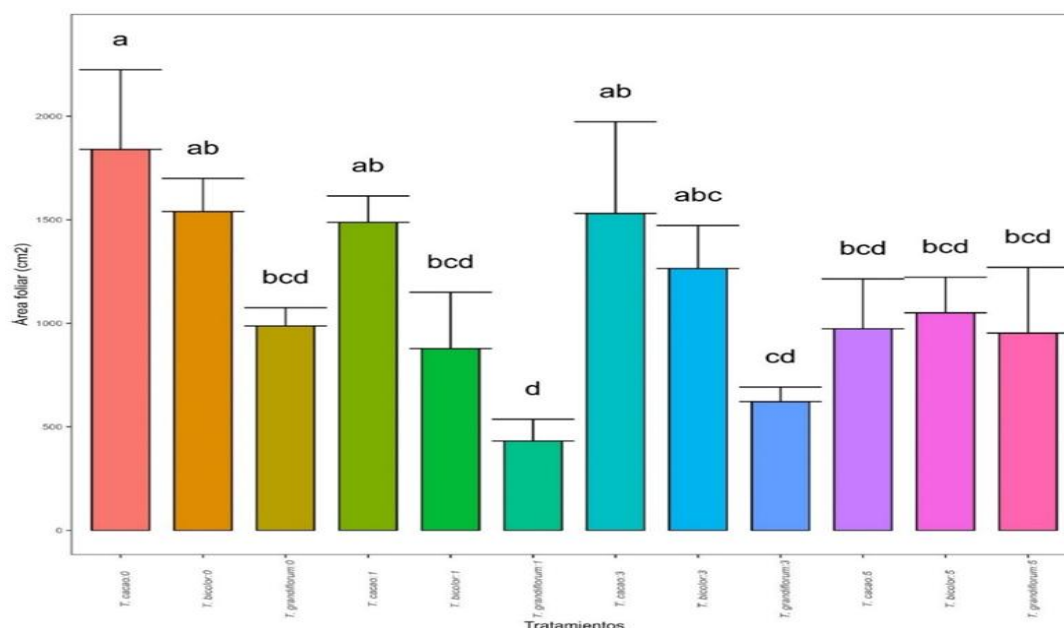
Tabla 6. Análisis ANOVA de concentración de Cd en área foliar

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P valor
Cadmio	3	1477562	492521	8,271	0,000594 ***
Especie	2	3073748	1536874	25,809	1,04e-06 ***
Cadmio: Especie	6	1062873	177145	2,975	0,025703 *
Error	24	1429165	59549		

En relación al análisis de Tukey (Tabla 7) la dosis de 0 ppm en *T. cacao* presenta el área foliar más grande (1 840 cm²), clasificada en el grupo a, sugiriendo que, en ausencia de cadmio, esta especie tiene un crecimiento foliar destacado. 0 ppm en *T. bicolor* (1 539,98 cm²) y 3 ppm en *T. cacao* (1 530,78 cm²) están en el grupo ab, indicando que *T. cacao* y *T. bicolor* mantienen áreas foliares relativamente grandes en concentraciones bajas o sin cadmio. A medida que aumentan las concentraciones de cadmio, el área foliar disminuye, especialmente en *T. grandiflorum*, que muestra las áreas foliares más bajas en las concentraciones de 3 ppm y 1 ppm, con valores de 621,92 cm² y 431,2 cm² respectivamente (grupo cd y d). Estos resultados sugieren que el cadmio afecta negativamente el desarrollo foliar en todas las especies de *Theobroma*, pero *T. cacao* y *T. bicolor* parecen tolerar mejor las bajas concentraciones de cadmio en comparación con *T. grandiflorum*, que muestra una disminución más pronunciada en el área foliar. Esto implica que *T. grandiflorum* es posiblemente más sensible al estrés por cadmio, lo cual podría reducir su capacidad fotosintética y, en consecuencia, su productividad.

Tabla 7. Análisis post-hoc (Tukey) de cadmio en área foliar

Tratamiento	Media	Grupo
0ppm: T. cacao	1840	a
0ppm: T. bicolor	1539,98	ab
3ppm: T. cacao	1530,78	ab
1ppm: T. cacao	1487,48	ab
3ppm: T. bicolor	1264,63	abc
5ppm: T. bicolor	1050,73	bcd
0ppm: T. grandiflorum	986,85	bcd
5ppm: T. cacao	973,53	bcd
5ppm: T. grandiflorum	952,92	bcd
1ppm: T. bicolor	877,86	bcd
3ppm: T. grandiflorum	621,92	cd
1ppm: T. grandiflorum	431,2	d

**Figura 5.** Resultados de área foliar en plantas de *Theobroma* en diferentes concentraciones de Cadmio

El análisis ANOVA demuestra que el cadmio tiene un efecto significativo sobre el área foliar en las especies de *Theobroma* estudiadas ($F = 8,271$, $p = 0,000594$). Este hallazgo es consistente con investigaciones previas que señalan la toxicidad del cadmio para las plantas, limitando procesos esenciales como la fotosíntesis, la división celular y la elongación de tejidos (Dong et al., 2019). El efecto significativo de la Especie ($F = 25,809$, $p = 1,04 \times 10^{-6}$) resalta la influencia genética en la tolerancia al cadmio. Específicamente, *T. cacao* y *T. bicolor* presentaron mayores áreas foliares en concentraciones bajas de cadmio, indicando una mayor tolerancia en comparación con *T. grandiflorum*, que mostró una disminución pronunciada incluso a concentraciones de 1 ppm. Esto se alinea con estudios que evidencian que la variabilidad genética influye en la capacidad de las plantas para mitigar el estrés por metales pesados, incluyendo la habilidad para excluir, almacenar o detoxificar cadmio en los tejidos (Haider et al., 2021).

Biomasa seca radicular

Para la biomasa seca radicular de plántulas de tres especies de *Theobroma* bajo diferentes concentraciones de cadmio, en la concentración de Cd a 0 ppm en *T. bicolor*. Presenta la mayor biomasa seca radicular con un promedio de 7,13 g, clasificado en el grupo a. Esto sugiere que, en ausencia de cadmio, *T. bicolor* desarrolla una masa radicular significativa, posiblemente debido a una mayor capacidad de absorción de nutrientes y agua. 0 ppm en *T. cacao* registra un promedio de 5,67 g y se clasifica en el grupo ab. Los resultados indican que la exposición al cadmio reduce la biomasa seca radicular en las tres especies de *Theobroma*, pero en distintos grados de severidad. *T. bicolor* y *T. cacao* parecen tener una mayor tolerancia al cadmio, ya que muestran una menor reducción en la biomasa radicular hasta concentraciones de 3 ppm. Por otro lado, *T. grandiflorum* es la especie más afectada, con una notable disminución de la biomasa radicular incluso a concentraciones bajas de cadmio, lo cual podría comprometer su capacidad para absorber nutrientes y agua, afectando su crecimiento y desarrollo general. Estos resultados son importantes para elegir las especies de *Theobroma* en suelos contaminados con cadmio, ya que una mayor biomasa radicular está relacionada con una mayor capacidad de adaptación y absorción de recursos en condiciones de estrés.

Los resultados obtenidos para la biomasa radicular seca en las plántulas de tres especies de *Theobroma* bajo diferentes concentraciones de cadmio (Cd) revelan patrones claros de sensibilidad diferencial entre las especies, así como una influencia significativa de la concentración de Cd aplicada.

El análisis ANOVA (Tabla 8) confirmó un efecto significativo tanto del factor Cd como de la interacción Cadmio sobre la biomasa radicular seca ($F = 10,328$, $p = 0,000149$ para Cd; $F = 3,875$, $p = 0,007606$ para la interacción). Esto respalda la idea de que la respuesta al Cd no solo depende de la concentración del metal, sino también de las características genotípicas de cada especie. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Zakariyya et al. (2022), quien observó que la biomasa radicular está correlacionada con la capacidad de absorción de Cd y su acumulación en las raíces. Además, estudios como los de Dong et al. (2019) destacan que el Cd ingresa principalmente a través de las raíces, donde puede ser retenido o translocado al resto de la planta dependiendo de los mecanismos de transporte activo, como las proteínas NRAMPs y HMAs.

Tabla 8. Análisis ANOVA de concentración de Cd en Biomasa radicular seca

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P valor
Cadmio	3	22,34	7,448	10,328	0,000149 ***
Especie	2	45,67	22,836	31,668	1,85e-07 ***
Cadmio: Especie	6	16,77	2,794	3,875	0,007606 **
Error	24	17,31	0,721		

Tabla 9. Análisis post-hoc (Tukey) de cadmio en área biomasa radicular seca

Tratamiento	Media	Grupo
0ppm: <i>T. bicolor</i>	7,13	a
0ppm: <i>T. cacao</i>	5,67	ab

1ppm: <i>T. cacao</i>	4,8	abc
3ppm: <i>T. cacao</i>	4,3	bcd
1ppm: <i>T. bicolor</i>	3,73	bcde
5ppm: <i>T. bicolor</i>	3,7	bcde
5ppm: <i>T. cacao</i>	3,46	bcde
3ppm: <i>T. bicolor</i>	3,23	bcde
5ppm: <i>T. grandiflorum</i>	2,63	cde
0ppm: <i>T. grandiflorum</i>	2,4	cde
3ppm: <i>T. grandiflorum</i>	1,9	de
1ppm: <i>T. grandiflorum</i>	1,53	e

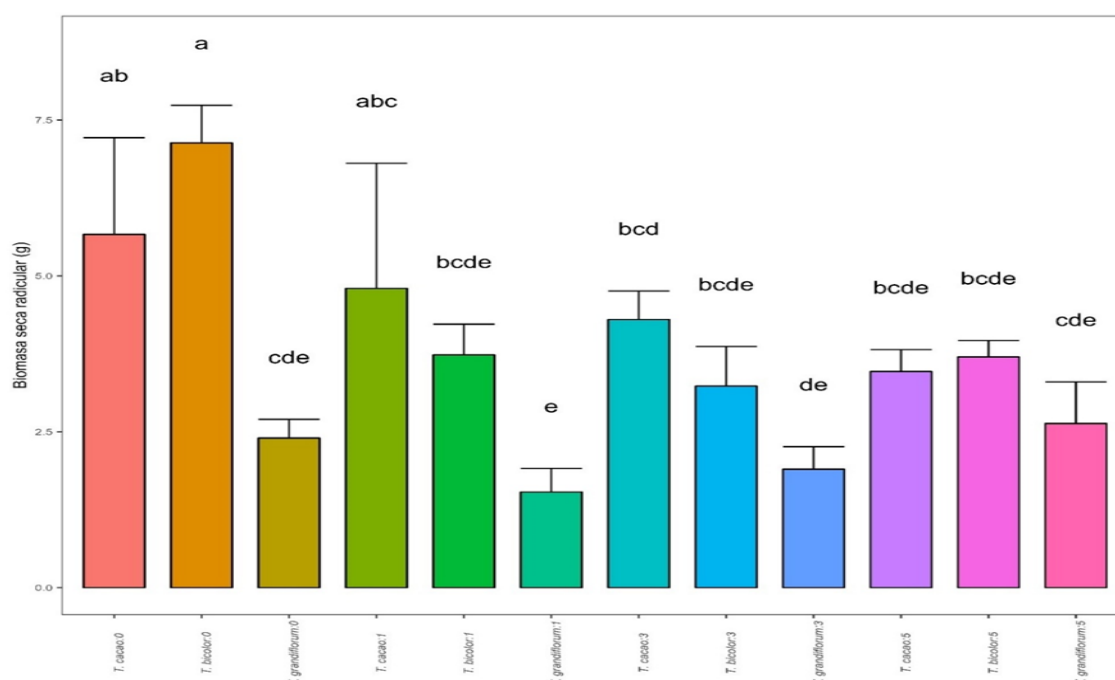


Figura 6. Biomasa seca radicular de plantas de *Theobroma* en diferentes concentraciones de Cadmio. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos después de la prueba de Tukey ($p < 0,05$)

En el análisis de Tukey, todos los tratamientos (combinaciones de especies y concentraciones de cadmio) se encuentran en el mismo grupo estadístico (a), lo que sugiere que no existen diferencias significativas en el contenido de clorofila entre las especies o bajo las distintas concentraciones de cadmio. Esto puede interpretarse como una resistencia relativamente uniforme de las tres especies de *Theobroma* en términos de su contenido de clorofila, independientemente de la concentración de cadmio. Los resultados indican que, en este caso, el cadmio no afecta significativamente el contenido de clorofila en las plántulas de *Theobroma* para ninguna de las especies estudiadas. Esto podría deberse a una capacidad de las especies para mantener su contenido de clorofila bajo condiciones de estrés por cadmio o a la baja sensibilidad de este parámetro en respuesta al cadmio en las concentraciones estudiadas moderada contaminación por cadmio.

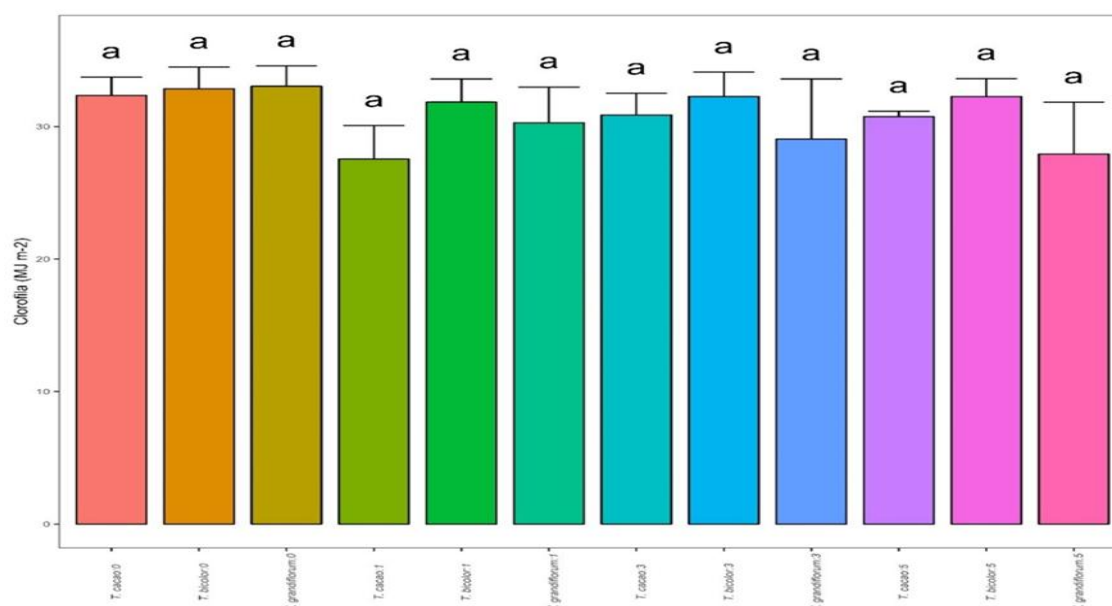
Los resultados del análisis de contenido de clorofila en plántulas de tres especies de *Theobroma* bajo diferentes concentraciones de cadmio proporcionan información valiosa sobre la respuesta de estas plantas al estrés por Cd en términos de su capacidad fotosintética. Aunque los valores de p no indican diferencias estadísticamente significativas en las variables estudiadas, es posible interpretar tendencias biológicamente relevantes a partir de los datos y apoyarse en estudios previos para contextualizar los hallazgos.

Tabla 10. Análisis ANOVA de concentración de clorofila en plantas de *Theobroma*

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P valor
Cadmio	3	43,01	14,336	2,543	0,0801
Especie	2	35,15	17,576	3,117	0,0626
Cadmio: Especie	6	38,65	6,441	1,142	0,3687
Error	24	135,32	6,53		

Tabla 11. Análisis post-hoc (Tukey) de cadmio en concentración de clorofila

Tratamiento	Media	Grupo
0ppm: T. grandiflorum	33,04	a
0ppm: T. bicolor	32,85	a
0ppm: T. cacao	32,34	a
3ppm: T. bicolor	32,27	a
5ppm: T. bicolor	32,26	a
1ppm: T. bicolor	31,86	a
3ppm: T. cacao	30,88	a
5ppm: T. cacao	30,76	a
1ppm: T. grandiflorum	30,29	a
3ppm: T. grandiflorum	29,06	a
5ppm: T. grandiflorum	27,93	a
1ppm: T. cacao	27,56	a

**Figura 7.** Concentración de plantas de *Theobroma* en diferentes concentraciones de Cadmio. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos después de la prueba de Tukey ($p < 0,05$)

En resumen, aunque el Cd es conocido por ser un inhibidor efectivo del metabolismo fotosintético los resultados del presente estudio sugieren que las especies de *Theobroma* estudiadas son capaces de mantener niveles estables de clorofila a concentraciones moderadas de Cd. Este comportamiento destaca la posibilidad de explorar estas especies para suelos contaminados, siempre considerando otros parámetros de crecimiento y desarrollo.

CONCLUSIONES

Las especies de *Theobroma* presentan diferencias significativas en la acumulación de cadmio en suelo y brotes; *T. grandiflorum* mostró la mayor acumulación en suelo, mientras que *T. bicolor* destacó en brotes a concentraciones de 5 ppm. Por el contrario, *T. cacao* presentó menor acumulación, sugiriendo mayor

tolerancia, aunque resultó ser la más sensible en términos de crecimiento vegetativo (altura y diámetro) ante concentraciones crecientes. El crecimiento se ve afectado significativamente, actuando el metal como un factor limitante donde *T. bicolor* muestra mayor estabilidad estructural frente a la susceptibilidad de *T. grandiflorum*. Estos resultados resaltan la influencia de las características fisiológicas e interacción genotipo-ambiental en la absorción y translocación del metal. Respecto al análisis fisiológico, el efecto del cadmio (0, 1, 3 y 5 ppm) en el contenido de clorofila no mostró diferencias estadísticamente significativas entre especies o concentraciones. Las tendencias sugieren que estas especies podrían poseer mecanismos compartidos de tolerancia, manteniendo niveles estables de clorofila bajo estrés. Estos hallazgos aportan información valiosa para seleccionar genotipos tolerantes y manejar suelos contaminados en sistemas agrícolas sostenibles y agroforestales.

FINANCIAMIENTO

El estudio-artículo recibió financiamiento del instituto de investigación de la Universidad Nacional de San Martín mediante resolución N° 1031-2023-UNSM/CU-R.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, recolección de datos, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación, redacción -borrador original, y redacción -revisión y edición: Correa-Tapia, J. L. y Ascón-Dionicio, G. U.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aikpokpodion, P., Lajide, L., & Aiyesanmi, A. F. (2012). Assessment of Heavy Metals Mobility in Selected Contaminated Cocoa Soils in Ondo State, Nigeria. *Global Journal of Environmental Research*, 6(1), 30–35.
https://www.academia.edu/6459035/Corresponding_Author_Assessment_of_Heavy_Metals_Mobility_in_Selected_Contaminated_Cocoa_Soils_in_Ondo_State_Nigeria
- Asman, A., Purung, M. H. bin, Lambert, S., Amiruddin, A., & Rosmana, A. (2021). Effect of rootstock and scion on resistance of cocoa clones to vascular streak dieback caused by *Ceratobasidium theobromae*. *Annals of Agricultural Sciences*, 66(1), 25–30.
<https://doi.org/10.1016/j.aos.2021.02.005>
- Bali, A. S., Sidhu, G. P. S., & Kumar, V. (2020). Root exudates ameliorate cadmium tolerance in plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(4), 1243–1275. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01012-x>
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of The Total Environment*, 533, 205–214.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- CHEN, L., LONG, X.-H., ZHANG, Z.-H., ZHENG, X.-T., RENGEL, Z., & LIU, Z.-P. (2011). Cadmium Accumulation and Translocation in Two Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) Cultivars. *Pedosphere*, 21(5), 573–580. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60159-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60159-8)
- Correa, J. E., Ramírez, R., Ruíz, O., & Leiva, E. I. (2021). Effect of soil characteristics on cadmium absorption and plant growth of *Theobroma cacao* L. seedlings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13), 5437–5445. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11192>

- Del Aguila, K. M., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L. A., & Becerra, A. G. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrízicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1), 137–146. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>
- Dong, Q., Fang, J., Huang, F., & Cai, K. (2019). Silicon Amendment Reduces Soil Cd Availability and Cd Uptake of Two Pennisetum Species. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), 1624. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091624>
- Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O., & Schulin, R. (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*, 678, 660–670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>
- Farooq, M. A., Ali, S., Hameed, A., Bharwana, S. A., Rizwan, M., Ishaque, W., Farid, M., Mahmood, K., & Iqbal, Z. (2016). Cadmium stress in cotton seedlings: Physiological, photosynthesis and oxidative damages alleviated by glycinebetaine. *South African Journal of Botany*, 104, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.11.006>
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., & Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., & Umaharan, P. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of The Total Environment*, 640–641, 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>
- Pereira de Araújo, R., Furtado de Almeida, A.-A., Silva Pereira, L., Mangabeira, P. A. O., Olimpio Souza, J., Pirovani, C. P., Ahnert, D., & Baligar, V. C. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.006>
- Primost, J. E., Marino, D. J. G., Aparicio, V. C., Costa, J. L., & Carriquiriborde, P. (2017). Glyphosate and AMPA, “pseudo-persistent” pollutants under real-world agricultural management practices in the Mesopotamic Pampas agroecosystem, Argentina. *Environmental Pollution*, 229, 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.006>
- Ribeiro, M. A. Q., de Almeida, A.-A. F., Alves, T. F. O., Gramacho, K. P., Pirovani, C. P., & Valle, R. R. (2016). Rootstock × scion interactions on *Theobroma cacao* resistance to witches’ broom: photosynthetic, nutritional and antioxidant metabolism responses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(3), 73. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2095-9>
- Ríos Vega, A. (1957). La relación patrón-injerto en la propagación vegetativa del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronómica*, 7(3–4), 223–232. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9447590>
- Sánchez-Pardo, B., Carpena, R. O., & Zornoza, P. (2013). Cadmium in white lupin nodules: Impact on nitrogen and carbon metabolism. *Journal of Plant Physiology*, 170(3), 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.10.001>
- Sandalio, L. M., Dalurzo, H. C., Gómez, M., Romero-Puertas, M. C., & del Río, L. A. (2001). Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*, 52(364), 2115–2126. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.364.2115>
- Solis Dominguez, F., Gonzalez Chavez, M., Carrillo Gonzalez, R., & Rodriguez Vazquez, R. (2007). Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 630–636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.014>
- Tziourrou, P., Golia, E. E., Barbieri, E., Androudi, M., Triantafyllidou, E., Kalaronis, D., & Tsaliki, E. (2026). Soil Metal Pollution Gradients and Cadmium Uptake Responses of Accumulator Plants in Mediterranean Environments. *Environments*, 13(4), 213. <https://doi.org/10.3390/environments13040213>
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N., & Marín, C. (2021). Una alta diversidad de hongos micorrízicos arbusculares influye en la absorción de cadmio y crecimiento

- vegetal del cacao. *Bioagro*, 34(1), 75–84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- YIN, J. P. T. (2004). Rootstock effects on cocoa in Sabah, Malaysia. *Experimental Agriculture*, 40(4), 445–452. <https://doi.org/10.1017/S0014479704002108>
- Zakariyya, F., Iman Santoso, T., & Abdoellah, S. (2022). Absorption of Cadmium and its Effect on the Growth of Halfsib Family of Three Cocoa Clones Seedling. *Pelita Perkebunan (a Coffee and Cocoa Research Journal)*, 38(3), 171–178. <https://doi.org/10.22302/iccri.jur.pelitaperkebunan.v38i3.534>
- Zug, K. L. M., Huamaní Yupanqui, H. A., Meyberg, F., Cierjacks, J. S., & Cierjacks, A. (2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(3), 72. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4109-x>