



ARTICULO ORIGINAL

Efectos fisiológicos del cadmio en cuatro genotipos de cacao propagados mediante estaquillas enraizadas

Jorge Luis Paz Urrelo^{1,a} | Vicente Serapio Pocomucha Poma^{2,b}

¹. Instituto Nacional de Innovación Agraria, San Martín, Perú

². Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú

^a. Ingeniero Agrónomo

^b. Doctor en philosophiae agricultura sustentable

Palabras clave:

CCN-51; IMC-67; ICS-39; TSH-565; contaminación del suelo, factor de translocación, metales pesados.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue estudiar los efectos del Cd en cuatro genotipos de cacao en términos de concentración de pigmentos de clorofila, asimismo evaluar el factor de traslocación del Cd en plantas de cacao obtenidos mediante propagación clonal mediante la técnica enraizamiento de estaquillas. El material vegetal utilizado en el presente trabajo de investigación fueron genotipos procedentes de los clones CCN 51, ICS 39, IMC 67 y TSH 565. El sustrato fue inoculado con tres dosis de Cd (0, 6 y 12 ppm). La fuente de Cd fue el hidrato de cloruro de Cadmio ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$). Se utilizó un Diseño Completamente al azar (DCA) con arreglo factorial de 4 x 3 factores, con 3 repeticiones, donde cada tratamiento estuvo formado por 4 plántulas de cacao obtenidas por enraizamiento de estaquillas, teniéndose en total 36 unidades experimentales. El análisis estadístico reveló que las plantas procedentes del genotipo CCN 51 fueron las que mostraron mayor tolerancia al metal pesado, aún en las dosis altas de Cd, debido a un aumento en el contenido de clorofila. Por otra parte, nuestros hallazgos advierten que el genotipo ICS 39 inoculado a la dosis media de Cd (6 ppm) presentó el factor de traslocación (FT) más alto (4.16). En contraste el genotipo CCN 51, evidenció el menor FT cuando fue expuesto a la dosis más alta de Cd. Estos hallazgos permitirán comprender el comportamiento de las plantas de cacao producidas por enraizamiento de estaquillas ante el estrés por Cd en términos de fisiológicos, siendo esta investigación un insumo más para profundizar estudios basados en los efectos de los metales pesados en cultivos de gran importancia económica como lo es el cacao.

Physiological effects of cadmium on four cocoa genotypes propagated by rooted cuttings

Key words:

CCN-51; IMC-67; ICS-39; TSH-565; soil contamination, translocation factor, heavy metals.

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effects of Cd on four cacao genotypes in terms of chlorophyll pigment concentration, and also to evaluate the Cd translocation factor in cacao plants obtained by clonal propagation using the cuttings rooting technique. The plant material used in this research were genotypes from clones CCN 51, ICS 39, IMC 67 and TSH 565. The substrate was inoculated with three doses of Cd (0, 6 and 12 ppm). The source of Cd was cadmium chloride hydrate ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$). A completely randomized design (CRD) with a 4 x 3 factorial arrangement was used, with 3 replications, where each treatment consisted of 4 cacao seedlings obtained by rooting cuttings, having a total of 36 experimental units. Statistical analysis revealed that plants from the CCN 51 genotype were the ones that showed the greatest tolerance to the heavy metal, even at high Cd doses, due to an increase in chlorophyll content. Furthermore, our findings warn that the ICS 39 genotype inoculated at the medium Cd dose (6 ppm) presented the highest translocation factor (TF) (4.16). In contrast, the CCN 51 genotype showed the lowest TF when exposed to the highest Cd dose. These findings will allow us to understand the physiological behavior of cacao plants produced by rooting cuttings under Cd stress. This research will be an additional input to deepen studies based on the effects of heavy metals on crops of great economic importance such as cacao.

Citar como: Paz Urrelo, J. L., Pocomucha Poma, V. S. Efectos fisiológicos del cadmio en cuatro genotipos de cacao propagados mediante estaquillas enraizadas. Revista de Investigación y Amazonía. 2025, 15(20): 5–12.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cultivo de cacao ha mostrado un balance monetario positivo, respecto a las exportaciones del Perú. Según MIDAGRI (2023), en el primer semestre del año 2023, se exportó alrededor de 46.7 mil toneladas de cacao y derivados representando un valor de económico de US\$ 162.8 millones, cifras que respaldan el posicionamiento y la importancia de este cultivo en la economía del país y sobre todo para aquellas familias dedicadas a su producción. Sin embargo, actualmente la cadena de valor de cacao podría verse limitada por la presencia de metales pesados, como el Cadmio (Cd) en los suelos donde se cultiva esta especie. El Cd es absorbido desde el suelo y translocado a diferentes compartimentos de la planta. Barraza et al, (2017), advierten que el Cd es un metal pesado que se bioacumula en las semillas del cacao, materia prima para muchos productos derivados, como el chocolate, hecho que podría reducir la inocuidad de los mismos y poner en riesgo la salud humana, como también las agroexportaciones del país.

El Cd es un elemento móvil en la solución del suelo y se encuentra de manera natural en la corteza terrestre en forma de minerales, de donde puede ser absorbido por las plantas y tomados de ellas por el ser humano, y en altas concentraciones pueden resultar ser tóxicas (Prieto et al. 2009). En consecuencia, una vez absorbido el Cd por la planta, el metal pesado puede promover cambios morfológicos y estructurales e incluso alteraciones en procesos fisiológicos, bioquímicos y moleculares (Almeida et al. 2013). Asimismo, según Pereira de Araújo et al, (2017), el Cd afecta nocivamente el crecimiento, la fotosíntesis, la absorción de nutrientes, el contenido de pigmentos cloroplásticos, la estructura celular y la expresión genética de las plantas.

Para Arévalo – Hernández et al, (2021), el Cd es un metal tóxico no esencial que se bioacumula en los tejidos del cacao, representando un riesgo para la exportación, situación que, consecuentemente podría afectar el bienestar económico de los pequeños productores con escasos recursos. Villar et al, (2022) reportaron una reducción del 31 % en las exportaciones hacia mercados europeos por las altas concentraciones de Cd en granos en la región Piura, por lo que, la absorción del metal por las plantas de cacao despertó una gran preocupación e interés, en tal sentido la Unión Europea emitió el Reglamento (UE) N.º 488/2014, que establece los niveles máximos permitidos de Cd en el chocolate y otros derivados del cacao, los cuales regula los umbrales del metal pesado, considerándose un máximo permisible de 0,8 ppm, situación que podría limitar la dinámica de esta cadena de valor y consecuentemente, afectar a familias y productores que dependen directamente del cultivo de cacao.

En tal sentido, conocer la dinámica del Cd, en plantas

de cacao obtenidas mediante la técnica de propagación enraizamiento de estaquillas podría conllevar a viabilizar las posibilidades de comprender el mecanismo de transporte y translocación de este metal desde el nivel radicular hasta la parte aérea de la planta y sus efectos fisiológicos a nivel de los pigmentos de clorofila, estructuras claves para el desarrollo y crecimiento normal de las plantas. Los objetivos del presente trabajo de investigación fueron determinar el factor de translocación del Cd en genotipos de cacao obtenidos mediante propagación de enraizamiento de estaquillas, y evaluar los efectos fisiológicos del Cd a nivel de clorofila total.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El estudio se realizó en el distrito de Juan Guerra, provincia y región de San Martín en el Laboratorio de Biotecnología de la Estación Experimental Agraria (EEA) El Porvenir, San Martín, ubicado en el Km 14.5 carretera Fernando Belaunde Terry zona sur, departamento de San Martín, con coordenadas UTM 354849 m. E y 9271185 m. N.

Equipos, materiales e insumos

En la presente investigación se utilizaron equipos como: balanza analítica, espectrómetro de emisión atómica de plasma inducida por microondas MP – AES, espectrofotómetro UV GENESIS 150, termohidrómetro. Como materiales e insumos: tijera de podar, bandejas forestales, bolsas almacigueras, hormona (ácido indol-3-butírico-AIB), sustrato (Premix 3), fungicida, hidrato de cloruro de Cadmio ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$).

METODOLOGÍA

Componentes en estudio

Clones de cacao:

- Clon CCN – 51
- Clon IMC – 67
- Clon: ICS – 39
- Clon TSH – 565

Concentraciones de cadmio (Cd):

- b1: 0 ppm,
- b2: 6 ppm y
- b3: 12 ppm.

Colecta del material vegetal

Constó de partes vegetativas (estaquillas de cacao) correspondiente a los clones CCN – 51 (Colección Castro Naranjal), IMC – 67 (Colección Iquitos mezclado con calabacillo), ICS – 39 (Selección del Colegio Imperial) y el TSH – 565 (Selección Híbrido Trinidad). Las estacas seleccionadas correspondieron

al segmento apical de las ramas de la planta de cacao (Figura 1), luego de colectadas fueron transportadas al laboratorio.

Figura 1. Segmento de estacilla colectado en campo.



Elaboración de sustrato para obtención de plántones

Se utilizó sustrato Premix 3 y fibra de coco (Figura 2). La relación proporcional de la mezcla fue 2:1, es decir dos baldes de 17 L de Premix 3, y un balde de la misma capacidad de fibra de coco. Luego se procedió a mezclar uniformemente ambos hasta lograr una uniformidad.

Figura 2. Sustratos: a) Premix 3, b) Fibra de coco.



Aplicación de hormona AIB al material vegetal

El material vegetal contó de plántones propagados por enraizamiento de estacillas. Una vez acondicionadas las estacillas en laboratorio y tratadas fitosanitariamente con fungicida agrícola (Flutolanil y Captan) a una dosis de 2 g/ L de agua, estas pasaron por un proceso de inmersión con la hormona AIB a una dosis de 6000 ppm a las estacillas de cacao (Figura 3), con la finalidad de estimular el enraizamiento de brotes (raíces).

Figura 3. Inmersión de hormona AIB a estacilla de cacao



Obtención de plántones de cacao

Esta etapa consistió en la siembra de las estacillas de los cuatro clones (CCN 51, TSH 565, ICS 39 e IMC 67) previamente colectadas y acondicionadas, en los tubetes de las bandejas forestales, procediendo con los dedos de la mano a ejercer suavemente cierta presión a la parte basal de las estacillas para darle estabilidad al ser sembrada (Figura 4). Luego estas fueron dispuestas en microtúneles para asegurar humedad constante y favorecer el crecimiento de las estacillas hasta convertirse en una nueva planta. Dentro del microtúnel, las plantas permanecieron aproximadamente entre 40 a 60 días con temperaturas que oscilaron entre 29° +/- 3 °C y una humedad relativa del 80 %, en las cuales se pudo observar el desarrollo de las primeras raíces.

Figura 4. a) Siembra de estacillas, b) Bandejas



Inoculación del material vegetal con Cd

Después de obtener los plántones de cacao en las bandejas forestales, estas fueron extraídas y sembradas en bolsas almacigueras de polipropileno que contenían el sustrato (suelo aluvial) contaminado con las dosis de Cd utilizados en la presente investigación (Figura 5). Se utilizó como fuente de Cd al hidrato de cloruro de Cadmio ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$). Una vez distribuidas los plántones, estos fueron trasladados al vivero para continuar con las evaluaciones respectivas.

Figura 5. Bolsas almacigueras conteniendo sustrato contaminado con Cd, según dosis



Análisis de laboratorio

a) Para la determinación de clorofilas, se utilizó tejido foliar de las plántulas de cacao obtenidas por enraizamiento de estaquillas. Para ello, se procedió con la desinfección y esterilización de los materiales de vidrio que fueron utilizados (tubos de ensayo de 15 mL y tubos de centrifuga de 50 mL) en una estufa a una temperatura de 50 °C por un periodo de 2 horas. El material vegetal (hojas), fue colectado de la parte central de la plántula y luego se procedió a pesar 1 gr de hojas frescas y sin nervaduras en una balanza analítica de precisión. Luego las hojas, fueron dispuestas en un mortero de porcelana y procedió con la molienda, macerándolas con 20 mL de etanol al 96 %, posteriormente añadimos a la molienda una pequeña cantidad de carbonato de calcio (CaCO_3). Después, se dejó reposar el macerado por 2 minutos para luego transferirlo con el uso de una pipeta graduada a los tubos de la centrifuga. Después centrifugamos el macerado por 3 minutos a 1000 (RFC) o fuerza G. Seguidamente, vertimos 8 mL de etanol de 96 % en los tubos de ensayo y adicionamos 2 mL de la muestra centrifugada, luego se agitó la solución con el objeto de uniformizarla. Hecha la dilución, se inició la etapa de lectura de las muestras (Figura 6), para ello transferimos la solución a una cubeta del espectrofotómetro UV visible para la lectura de absorbancia. Luego, la absorbancia se leyó a 649, 665 y 654 nm de longitud de onda. Para cada lectura se equilibró el instrumento previamente con un blanco del solvente (etanol 96 %). Finalmente, la cantidad de clorofila presente en el extracto y tejido correspondiente fue calculada con la siguiente ecuación:

$$\text{mg Clor. total / g PF} = \frac{D_{654} * 1000}{39.8} * \frac{V}{1000} * W$$

Donde:

D: densidad óptica del extracto leído a longitud de onda indicado

V: volumen final del extracto alcohólico

W: peso de la muestra del tejido verde.

b) En relación a los cálculos de factor de translocación del Cd desde la parte radicular a la parte foliar, se realizó según la fórmula adaptada por (Pachura et al. 2016):

$$FT = \frac{\text{Concentración del metal pesado parte aérea (hojas)}}{\text{Concentración del metal pesado parte raíz}}$$

Finalmente, todas las muestras de tejidos vegetales, previa habilitación, se envió al laboratorio de suelos, aguas y foliares de la EEA El Porvenir para su respectivo análisis mediante espectrofotometría de emisión atómica de plasma por microondas (MP- AES) (Figura 7). Se procedió a cuantificar concentración de Cd en raíces, tallos y hojas en los genotipos de cacao estudiados. El análisis de espectrofotometría, se basó en el método de determinación de Metales Totales en Suelos por MP-AES (Cd), teniéndose como referencia a la norma NTP ISO/ IEC 17025, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de prueba y calibración. Además, la lectura de Cd se rigió en las metodologías: a) EPA Method 3050B. Revision 2. 1996. Acid Digestion of Sediments, sludges and soils y b) EPA Method 6010D. Revision 5. 2018. Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry

Figura 6. Lecturas de muestras foliares en espectrofotómetro UV visible:

a) Disposición en tubos de ensayo, b) Trasferencia de cubeta al espectrofotómetro UV visible, c) Introducción de cubetas al espectrofotómetro UV visible, d) Lectura de absorbancia.



Figura 7. Lecturas de la concentración de Cd en tejidos vegetales por espectrofotómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP- AES)



Análisis estadístico

Los datos generados fueron procesados en hojas de cálculos Excel, además para el análisis e interpretación de los mismos, se utilizó el análisis de varianza (ANVA), y un test de comparación de medias (Duncan, $P \leq 0,05$), usando el software estadístico R (R versión 4.4.1., R Core Team, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de efectos del cadmio en pigmentos de clorofila

Las variables consideradas para evaluar los efectos del Cd a nivel de pigmentos en los genotipos de cacao en el presente estudio fueron las concentraciones de clorofilas. La concentración de clorofila total se presenta en la Tabla 1, y Figura 8. Las mismas fueron sometidas a pruebas de verificación de supuestos, normalidad y homocedasticidad, utilizando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene respectivamente. Posteriormente, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, acompañada del ajuste de Holm para comparaciones múltiples, dado a que los datos no cumplieron con estos supuestos.

Tabla 1. Concentración de clorofila total de los diferentes tratamientos (clon x dosis), según la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

Clon	Dosis (ppm)	Clorofila total, (nm)
CCN 51	0	3.51 ± 0.74^a
	6	3.83 ± 0.83^a
	12	4.99 ± 0.42^a
IMC 67	0	3.85 ± 0.18^a
	6	4.45 ± 0.83^a
	12	3.62 ± 1.14^a
ICS 39	0	4.52 ± 1.32^a
	6	3.76 ± 0.83^a
	12	4.29 ± 0.48^a
TSH 565	0	3.68 ± 0.31^a
	6	3.13 ± 0.60^a
	12	3.40 ± 0.90^a

Valores promedios ($n = 3$). Diferencias significativas ($p < 0.05$) usando Kruskal test. Letras iguales indican que no hubo diferencias significativas.

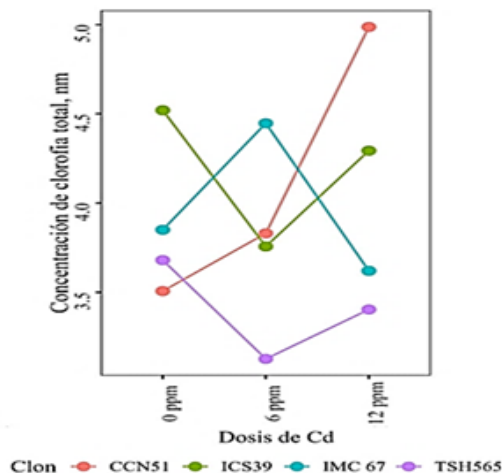
Según los resultados obtenidos mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis en el presente estudio, para la concentración de clorofila total, se evidencia que no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos estudiados. Sin embargo, en nuestro estudio advertimos que el clon CCN 51 demostró un grado de tolerancia al Cd, evidenciado por el aumento en el contenido de pigmentos de clorofila.

Asimismo, las plantas de grupo de genotipos, obtuvieron la mayor concentración de clorofila (4.99 ± 0.42 nm) aun cuando las plantas fueron expuestas a la dosis alta de Cd (12 mg kg^{-1}), aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa en relación a los otros genotipos, según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

La toxicidad por Cd puede afectar el rendimiento fotosintético de las plantas mediante la reducción del contenido de clorofila (Sandalo et al. 2001). El Cd inhibe el crecimiento radicular, disminuye el contenido de clorofila y afecta la fotoactivación del fotosistema II de la planta al impedir el transporte de electrones (Huang et al. 2017, Kapoor et al. 2021) afectando la eficiencia fotosintética. Sin embargo, los resultados sugieren que el clon CCN 51 presenta ciertos niveles de tolerancia al Cd, evidenciado por el aumento en el contenido de pigmentos cloroplásticos y la aparente ausencia de daños significativos en el fotosistema II (PSII), coincidiendo con las observaciones de Fernández-Paz et al. (2021) en progenies no injertadas de IMC 67.

En relación a los genotipos ICS 39 y TSH 565, estos no mostraron diferencias significativas, asimismo, evidenciaron una disminución de la concentración de clorofila cuando las plantas fueron expuestas a la dosis medial. Finalmente, el clon IMC 67 mostró una disminución en la concentración de clorofila cuando las plantas fueron expuestas a la dosis alta de Cd, observándose un efecto adverso con el aumento de las dosis de Cd (Figura 8). Nuestros hallazgos son concordantes a los reportados por (Khudsar et al. 2001), quienes refieren que la exposición al Cd reduce el contenido de clorofila y la eficiencia fotosintética, lo que resulta en una menor disponibilidad de energía para el crecimiento foliaren en plantas de Cajanus cajan.

Figura 8. Concentración de clorofila total de los diferentes tratamientos estudiados (clon x dosis).



Determinación del factor de translocación (FT) del Cd en plántulas de Theobroma cacao obtenidos mediante enraizamiento de estaquillas.

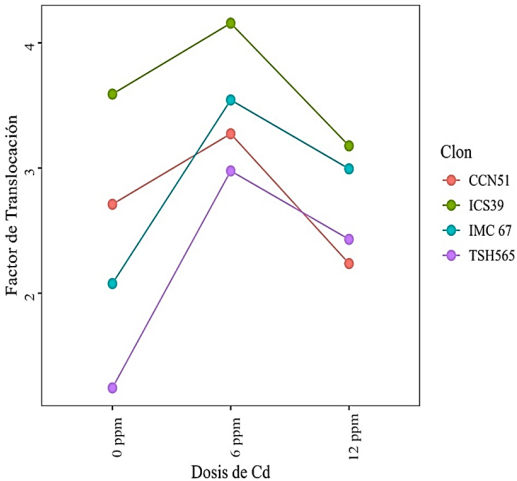
El factor de traslocación del Cd de los tratamientos estudiados, se presentan en la Tabla 2 y Figura 9. Complementariamente, el factor de traslocación fue sometido a pruebas de verificación de supuestos, normalidad y homocedasticidad, utilizando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene respectivamente. Posteriormente, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, acompañada del ajuste de Holm para comparaciones múltiples, dado a que los datos no cumplieron con estos supuestos. Nuestros resultados advierten que las plantas de cacao no mostraron significancia respecto a este parámetro. Asimismo, teniendo en cuenta que el FT expresa la capacidad de los genotipos de cacao seleccionados para transportar Cd desde la raíz a las partes aéreas (De Almeida et al.,2022), podemos advertir que las plántulas estudiadas, particularmente del genotipo ICS 39 (Tabla 2) inoculados a la dosis media de Cd (6 ppm), exhibieron una mayor translocación de Cd desde las raíces a las partes aéreas. Según Mingorance et al.; (2007), un FT > 1, indica que los órganos de la planta de cacao están enriquecidos con Cd. En nuestro estudio, según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, no existió diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en relación al FT, sin embargo, las plantas del genotipo ICS 39 reportan el valor más alto respecto a este parámetro (4.16 ± 0.44), aun cuando fueron expuestas a la dosis medial de Cd (6 ppm) (Figura 9).En tal sentido, nuestros resultados se alinean a los encontrados por Ortiz-Álvarez et al. (2023), quienes al evaluar la acumulación de Cd en tres progenies de cacao (IMC 67 x PA 121, SCA 6 X PA 121 e IMC 67) reportan un FT superior a 4, indicando que las partes aéreas de estos genotipos de cacao estaban enriquecidos significativamente con Cd. Para Galvis et al.; (2023), los distintos genotipos de cacao, muestran diferentes niveles de eficiencia en la translocación del Cd, como lo fue para el genotipo EET 61, quien mostró un FT alto de Cd en los brotes en comparación con otros genotipos, indicando un mayor movimiento del metal desde las raíces a los brotes en un periodo de tiempo.

Tabla 2. Factor de traslocación (FT) del Cd de los diferentes tratamientos (clon x dosis), según la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

Clon	Dosis	FT
CCN 51	0 ppm	2.71 ± 2.31^a
	6 ppm	3.27 ± 1.15^a
	12 ppm	2.24 ± 0.20^a
IMC 67	0 ppm	2.08 ± 0.49^a
	6 ppm	3.54 ± 1.88^a
	12 ppm	2.99 ± 1.06^a
ICS 39	0 ppm	3.59 ± 3.09^a
	6 ppm	4.16 ± 0.44^a
	12 ppm	3.18 ± 0.84^a
TSH 565	0 ppm	1.24 ± 0.63^a
	6 ppm	2.98 ± 0.30^a
	12 ppm	2.43 ± 0.49^a

Valores promedios (n = 3). Diferencias significativas (p < 0.05) usando Kruskal test. Letras iguales indican que no hubo diferencias significativas.

Figura 9. FT de los tratamientos estudiados (clon x dosis), según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.



CONCLUSIONES

A nivel de pigmentos de clorofila, algunos genotipos de cacao, como el clon CCN 51, no solo pueden tolerar niveles más altos de Cd, sino que podrían beneficiarse potencialmente de ellos, debido a un aumento en el contenido de clorofila. En contraste, el genotipo ICS 39 y TSH 565 fueron los más sensibles al Cd, experimentando una reducción de pigmentos de clorofila bajo concentraciones más altas de Cd.

El genotipo ICS 39 inoculado a la dosis media de Cd (6 ppm) presentó el factor de traslocación (FT) más alto (4.16). En contraste el genotipo CCN 51, que evidenció el menor FT cuando fue expuesto a la dosis más alta de Cd.

REFERENCIAS

- Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Barraza, F., Farfán, A., He, Z., & Baligar, V. (2021). Growth and nutritional responses of wild and domesticated cacao genotypes to soil Cd stress. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144021>
- Almeida, A.-A. F., Gomes, L. M. C., Souza, V. L., Valle, R.R., 2013. Morphophysiological, Biochemical, Ultrastructural and Molecular Responses of Cadmium Toxicity in Plants. In: Mirza, Hasanuzzaman, Masayuki, Fujita (Eds.), *Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental*. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, pp. 36–76.
- Barraza, F., Maurice, L., Uzu, G., Becerra, S., López, F., Ochoa-Herrera, V., Ruales, J., Schreck, E., 2018. Distribution, contents and health risk assessment of metal (loid)s in small-scale farms in the Ecuadorian Amazon: an insight into impacts of oil activities. *Sci. Total Environ.* 622–623, 106–120. <https://doi.org/10.1016/J.scitotenv.2017.11.246>.
- De Almeida, N.M.; Furtado De Almeida, A.-A.; De Almeida, N.S.; Do Nascimento, L.J.; De Carvalho Neto, C.H.; Pirovani, C.P.; Ahnert, D.; Baligar, V.C. Scion-Rootstock Interaction and Tolerance to Cadmium Toxicity in Juvenile *Theobroma cacao* Plants. *Sci. Hortic.* 2022, 300, 111086.
- Fernández-Paz J, Cortés AJ, Hernández-Varela CA, Mejía-de-Tafur MS, Rodríguez-Medina C and Baligar VC, 2021. Rootstock-Mediated Genetic Variance in Cadmium Uptake by Juvenile Cacao (*Theobroma cacao* L.) Genotypes, and Its Effect on Growth and Physiology. *Front. Plant Sci.* 12:777842. doi: 10.3389/fpls.2021.777842
- Huang, M., H. Zhu, J. Zhang, D. Tang, X. Han, L. Chen, D. Du, J. Yao, K. Chen, and J. Sun. 2017. Toxic effects of cadmium on tall fescue and different responses of the photosynthetic activities in the photosystem electron donor and acceptor sides. *Sci. Rep.* 7, 14387. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14718-w>
- Galvis, D. A., Yeirme, Yaneth, Jaimes-Suárez., Jairo, Rojas, Molina., Rosalba, Ruiz., C., León-Moreno., Fabricio, E., L., Carvalho. (2023). 7. Unveiling Cacao Rootstock-Genotypes with Potential Use in the Mitigation of Cadmium Bioaccumulation. *Plants*, doi: 10.3390/plants12162941
- Mingorance, M.D.; Valdés, B.; Oliva, S.R. Strategies of Heavy Metal Uptake by Plants Growing under Industrial Emissions. *Environ. Int.* 2007, 33, 514–520.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2023). Cacao: Observatorio de Productos básicos. Recuperado el 09 de octubre de 2024, <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5264502/%20Commodities%20Cacao%3A%20ene-mar%202023.pdf?v=1697059698>.
- Ortiz-Álvarez, A.; Magnitskiy, S.; Silva-Arero, EA; Rodríguez-Medina, C.; Argout, X.; Castaño-Marrín, A.M. Acumulación de Cadmio en Plantas de Cacao (*teobroma cacao* L.) bajo estrés por sequía. *Agronomía* 2023, 13, 2490. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102490>
- Pachura, P., A. O. Kubicka, and B. S. Grabowska. 2016. Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. *Desalin. Water Treat.* 57: 1469 – 1477.
- Pereira de Araújo, R., Furtado, de Almeida, A. A., Pereira, L. S., Mangabeira, P. A., Souza, J. O., et al. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 144, 148–157. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.06.006
- Prieto, M. J., González, R. C., Román, G. A. y Prieto, G. F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29 - 44.
- R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Kapoor, D., S. Singh, P.C. Ramamurthy, S. Jan, S. Bhardwaj, S.S. Gill, R. Prasad, and J. Singh. 2021. Molecular consequences of cadmium toxicity and its regulatory networks in plants. *Plant Gene* 28, 100342. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100342>
- Khudsar, T., e Iqbal, M. (2001). Cambios inducidos por cadmio en la epidermis foliar, tasa fotosintética y concentración de pigmentos en *Cajanus cajan*. *Biología Plantarum*, 44 (1), 59–64. <https://doi.org/10.1023/A:1017918320697>

- Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gómez, M., Romero-Puertas, M.C., & Del Rio, L.A. (2001). Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*, 52, 2115–2126. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.364.2115>.
- Villar, G., Yovera, F., Pezo, A., Thomas, E., Roscioli, F., Sandy Da Cruz, R., Jimenez, E., Lopez, A., Aguilar, F., Espinoza, E., Davila, C., Chavez Hurtado, C., Lastra, S., Zavaleta, D., Charry, A., Atkinson, R. (2022). Caracterización socioeconómica de las cadenas de valor de cacao con énfasis en la problemática de cadmio en Piura y Huánuco, Perú. Alianza Bioversity & CIAT, Lima, Peru. Available at: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/125328>