



Micorrización y concentración de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.), en San Martín

Mycorrhization and cadmium concentration in agroforestry systems with cocoa (*Theobroma cacao* L.), in San Martín

Solsol-Salis, Stefany^{1*}

Vallejos-Torres, Geomar¹

¹Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

Recibido: 17 Oct. 2024 | **Aceptado:** 24 Mar. 2025 | **Publicado:** 20 Jul. 2025

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

Cómo citar este artículo: (2025). Solsol-Salis, S. & Vallejos-Torres, G. Micorrización y concentración de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.), en San Martín. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 5(2), e790. <https://doi.org/10.51252/raa.v5i2.790>

RESUMEN

Esta investigación se efectuó en 3 localidades cacaoteras de la provincia de Lamas y en el “Laboratorio de Cultivos de Tejidos Vegetales de la UNSM” con el objetivo de estudiar la micorrización y contenido de metales pesados en el cultivo de cacao con sistemas agroforestales en San Martín. La colonización micorrízica y concentración de cadmio en muestras de raíz y granos de cacao no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados; sin embargo, la concentración de cadmio en suelo y hojas mostraron diferencias significativas; donde el T3 presentó menor concentración (0,61 ppm) de cadmio en el suelo, mientras que el T1 obtuvo la mayor concentración de cadmio (4,6 ppm) en hojas, la colonización micorrízica en raíces de cacao mostró una correlación media positiva con el pH del suelo y una correlación media negativa con el fósforo del suelo, finalmente se observó una correlación positiva moderada entre el cadmio del suelo y variables edáficas (MO y P), mientras que se encontró una correlación moderadamente negativa entre el cadmio en raíces, hojas y la variable de pH del suelo; el cadmio en granos de cacao presentó una correlación negativa media a moderada con las variables edáficas (P, % MO y pH).

Palabras clave: colonización; correlación; fitorremediación; micorrizas; suelo

ABSTRACT

This research was carried out in 3 cocoa-producing locations in the province of Lamas and in the “UNSM Plant Tissue Culture Laboratory” with the aim of studying mycorrhization and heavy metal content in cocoa cultivation with agroforestry systems in San Martín. Mycorrhizal colonization and cadmium concentration in root samples and cocoa beans did not show significant differences between the treatments studied; however, cadmium concentration in soil and leaves showed significant differences; where T3 had the lowest concentration (0.61 ppm) of cadmium in the soil, while T1 had the highest concentration of cadmium (4.6 ppm) in leaves, mycorrhizal colonization in cocoa roots showed a medium positive correlation with soil pH and a medium negative correlation with soil phosphorus, finally a moderate positive correlation was observed between soil cadmium and soil variables (MO and P), while a moderately negative correlation was found between cadmium in roots, leaves and the soil pH variable; cadmium in cocoa beans presented a medium to moderate negative correlation with soil variables (P, % MO and pH).

Keywords: mycorrhizae; soil; correlation; colonization; phytoremediation



1. INTRODUCCIÓN

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son uno de los hongos más distribuidos en todo el mundo que forman asociaciones de simbiosis con más del 80% de las especies de plantas terrestres (Behrooz et al., 2019). La relación de simbiosis formada entre las plantas y los HMA es beneficiosa para el crecimiento de las plantas, la absorción de nutrientes, la calidad del suelo y la resistencia al estrés (Hu et al., 2022). La relación de simbiosis entre la planta huésped y los HMA mejoró sustancialmente la resistencia al estrés por sequía. Los HMA mejoran la supervivencia de las plántulas (Wu & Zou, 2017), promueven la absorción y el transporte de agua en la planta huésped, mejoran la eficiencia del uso del agua de la planta y las capacidades de intercambio de gases.

A lo largo del tiempo el cultivo de cacao, se expuso a contaminantes que dañan la salud humana por su alta presencia de metales pesados como son el cadmio, plomo y níquel. El cadmio no tiene un aporte significativo para el bienestar del ser humano, ya que provoca malestar en todo el cuerpo; de tal manera que tiene un efecto dañino contra los riñones, los pulmones y los huesos; las plantas absorben el cadmio a través del sistema radicular hasta llegar al xilema, donde se traslada a las hojas y finalmente entra a los granos; los factores que inhiben la absorción de cadmio por las plantas de cacao incluyen: el ciclo de vida de la planta, su nutrición y la variación debido a los diferentes genotipos de este (Meter et al., 2019). El cultivo del cacao es capaz de adquirir, transferir y acumular cadmio en el fruto (Gramlich et al., 2017); por lo tanto, si los cultivos se cultivan en suelos que contienen cadmio, es posible que se encuentren trazas de este metal en el grano, como es el caso de Perú (Arévalo-Gardini et al., 2017).

La cantidad de cadmio permitida en el chocolate es de 0,8 a 0,9 miligramos por kilogramo. No obstante, en otras regiones del norte como son Piura, Tumbes, San Martín, la concentración de la mayoría de productos derivados del cacao son mayores, por lo que la ciudadanía puede verse perjudicada (Gonzales, 2023). Ante este problema, encontramos diversas investigaciones donde se menciona que algunos microorganismos como los hongos, que ayudan a la formación de micorrizas arbusculares, son cruciales para los procesos de fitorremediación, fitoextracción y fitoestabilización de metales en suelos contaminados por cadmio (Ibarra Ramos, 2022).

En los sistemas agroforestales, los hongos micorrízicos arbusculares ocupan alrededor del 90 %, además, la presencia de un gran número de hongos micorrízicos en estos sistemas hace que una gran proporción de especies de plantas coexistan en una determinada zona de suelo, lo que permite encontrar asociaciones exitosas con diferentes hongos micorrízicos arbusculares (Prieto et al., 2012). La utilización de los hongos arbusculares podrían tener un impacto importante para contrarrestar la presencia del cadmio en cacao, reduciendo la absorción de metales pesados por las plantas y el suelo mediante la inmovilización de metales (Ferrol et al., 2016; Wang, 2017).

Por tanto, se planteó como objetivo general; Analizar el efecto de la micorrización y el contenido de cadmio en cultivos de cacao en sistemas agroforestales en la región San Martín para generar metodologías y tecnologías que sean de utilidad para los productores de cacao en el mejoramiento del suelo y la reducción de la concentración de cadmio en soluciones de suelo, granos de cacao y partes morfológicas de las diferentes variedades del cultivo de cacao.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del experimento

El presente trabajo se realizó en cuatro zonas de muestreo de cacao en diferentes sistemas agroforestales ubicadas en la provincia de Lamas con las siguientes coordenadas: Latitud sur (06° 24' 52") y Longitud oeste (76° 30' 43") con altitud de 812 m.s.n.m; las condiciones climáticas en promedio durante la investigación fueron humedad relativa (46 %), temperatura máxima (32 °C) y mínima (19 °C); las

evaluaciones micorrízicas fueron realizadas en los ambientes del “Laboratorio de Cultivos de Tejidos Vegetales de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional San Martín (UNSM)”.

2.2. Actividades realizadas

Zona de muestreo

Las cuatro zonas identificadas en la provincia de Lamas (Tabla 1), tenían un área aproximadamente de 1 250 m², dentro de las cuales se consideraron tres plantas distribuidas al azar para realizar la extracción de muestras de suelo, raíz, hojas y mazorcas de cacao en cada zona.

Tabla 1. Zonas de muestreo y su respectiva composición

Nº	Sitio de estudio	Localidad	Sistema agroforestal	Composición Secundaria	Nombre científico
1	CP-CG	Cedro pampa	Cacao + Guaba	Guaba	<i>Inga edulis</i>
2	SA-CEF	San Antonio	Cacao + Especies forestales	Capirona Pinochuncho Caoba Paliperro	<i>Calycophyllum spruceanum</i> <i>Schizolobium amazonicum</i> <i>Swietenia macrophylla</i> G. King <i>Miconia barbeyana</i> Cogniaux
3	SA-CP	San Antonio	Cacao + Policultivo	Guaba Zapote Mandarina	<i>Inga edulis</i> <i>Pouteria sapota</i> <i>Citrus reticulata</i>
4	T-C	Tabalosos	Cacao		

Leyenda: CP: Cedro Pampa, CG: Cacao + Guaba; SA: San Antonio, CEF: Cacao + especies forestales; CP: Cacao + Policultivo; T: Tabalosos, C: cacao.

2.3. Procedimiento para la colonización micorrízica en raíces

Se procedió a lavar las raíces con abundante agua para retirar el suelo adherido, en seguida se colocó las raíces en partes pequeñas en tubos de ensayo de 16 x150 mm con hidróxido de carbono (KOH) al 10 % hasta ser cubierta las muestras por 3 horas para la hidratación de las raíces, se procedió a efectuar “tinción de las raíces, según la técnica de Phillips & Hayman (1970)” con modificaciones, luego estas fueron llevadas a baños maría a 90 °C por 45 minutos con el fin de remover el contenido citoplasmático y clarificar el tejido cortical de las raíces, pasado el tiempo fueron retirados del baño maría y se agregó agua oxigenada (H₂O₂) de 20 volúmenes por 1 minuto a temperatura ambiente para clarificar los pigmentos de las raíces; posteriormente se retiró el contenido líquido sobrante y se procedió al lavado con agua.

Se empleó la técnica de Phillips & Hayman (1970), con adición de tinta azul Parker (5,7 %) a cada tubo, se dejó reposar durante quince minutos a temperatura ambiente; luego se llevaron a baño maría durante 15 minutos más a 90 °C, después se retiró la tinta excesiva de los tubos y las raíces se enjuagaron con lactoglicerol, Al finalizar el proceso, las raíces teñidas se mantuvieron a temperatura ambiente con lactoglicerol por 30 min. Para la evaluación de raíces se colocaron 20 unidades de 1,5 cm; estas fueron colocadas en laminillas cobre objeto, para así ser evaluadas en el microscopio a 10x, 20x y 40x de aumento. En dichas muestras se observaron la presencia y ausencia de estructuras micorrizas de HMA con la metodología de Brundrett et al. (1995).

2.4. Determinación de la colonización micorrízica en raíces

Para realizar el análisis de la colonización micorrízica se procedió a realizar la técnica presentada por Brundrett et al. (1995), que se basó en colocar una porción de la raíz en el campo de visión del microscopio y dividirla en tres zonas de visión (superior, media e inferior) y ausencia de seda El proceso se realizó con 20 segmentos montados en portaobjetos de vidrio, el grado de colonización de micorrizas de las raíces de las plantas por HMA se calculó utilizando la siguiente fórmula matemática.

$$\% \text{ CM} = (n/N) \times 100$$

Donde:

% **CM** = Porcentaje de colonización micorrízica.

N = Número total de segmentos que se han evaluado.

n = Número total de áreas que contienen estructuras micorrízicas.

2.5. Determinación de concentración de cadmio

Se tomó suelo de 2 a 3 cm de espesor hasta una profundidad de 20 cm, donde se procedió a cortar en los costados como en la parte superior de la muestra extraída para eliminar impurezas que dañen la muestra. Cada muestra obtenida constó de 2 kg de suelo/raíces de cada planta muestreada, haciendo un total de 12 muestras. Se procedió a colocar en bolsas de plásticos, rotulados para luego ser transportado al laboratorio. El cadmio en suelos se determinó mediante el método EPA 3050B de FLAMA (EPA, 1996).

- Muestreo en hojas

El procedimiento se realizó recolectando cuatro hojas por planta seleccionados de los cuatro puntos cardinales en el centro de la copa, de tal manera se recolectaron 12 hojas por tratamiento, la operación fue repetida por cada uno de los cuatro bloques Brundrett et al. (1995). Se rotularon adecuadamente para ser llevados al laboratorio para examinar la existencia del cadmio en las hojas”.

- Muestreo en granos de cacao

La recolección consistió en seleccionar 12 frutos de cacao por cada unidad de muestreo, estas muestras se mezclaron con la finalidad de conseguir una sola muestra homogénea y representativa. Se depositó los granos de cacao en bolsas plásticas con la finalidad de no contaminar la muestra con otros metales pesados, se procedió a amarrarlas y dejarlo fermentar por tres días. Posteriormente, las muestras se secaron bajo sombra en un ambiente cerrado donde no se podía contaminar. De cada muestra compuesta se seleccionaron tres submuestras o repeticiones para realizar el análisis correspondiente. Para el cálculo de la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ CM} = (n/N) \times 100$$

Donde:

% **CM** = Porcentaje de concentraciones de cadmio.

N = Número total de segmentos que se han evaluado.

n = Número total de variables con existencia de concentraciones de cadmio.

2.6. Análisis de caracterización de suelo

Se realizó ocho muestras de suelos para el análisis de caracterización de suelos, colectado a 20 cm de profundidad. El pH se determinó utilizando un potenciómetro de suspensión de suelo-agua-relación 1:2,5 y el método de extracción de OLSEN modificado para determinar el fósforo. El método de WALKLEY y BLACK encuentra $\text{Na HCO}_3 = 0,5\text{M}$, pH 8,5 y materia orgánica Brundrett et al. (1995).

2.7. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante la prueba de comparación de medias de Duncan con una significancia estadística del 95% ($p < 0,05$). La normalidad y homocedasticidad de los datos se verificaron mediante las

pruebas de Shapiro Wilk y Levene. Se realizó una correlación de Pearson entre las concentraciones promedio de Cd en granos, hojas, raíces y suelos con MO, P y pH en el programa R Studio.

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

3.1. Correlación entre la colonización micorrízica y los sistemas agroforestales en el cultivo de cacao

La prueba de Kruskal-Wallis demostró que no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$). Los valores estuvieron dentro de un rango de 82 a 96 % de colonización micorrízica en promedio, presentando los valores más altos cacao + Especies Forestales y cacao + policultivo (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao

Sitio de estudio	Descripción	% Colonización micorrízica promedio
CP-CG	Cacao + Guaba	82
SA-CEF	Cacao + Especies Forestales	96
SA-CP	Cacao + Policultivo	96
T-C	Cacao	94

Recientemente Irigoin Quintana & Trigo Tuesta (2022), encontraron cantidades del Cd en raíces y semillas de *T. cacao*, superiores al límite máximo permisible, causando preocupación para el bienestar del ser humano; por otro lado, Rodríguez-Morelos et al. (2014) y Shi et al. (2016) observaron la presencia de micorrizas en las diversas especies vegetales evaluadas. Tederso et al. (2020) reportaron alta asociación de estos microorganismos con el cultivo y otras especies vegetales silvestres adyacentes a estos, la presencia de estas especies secundarias es vital para fase de esporulación de los HMA nativos y a su vez facilitan el intercambio de recursos entre las plantas huésped. También, Tederso et al. (2020) encontraron que la diversidad de plantas y HMA están relacionadas positivamente en el estudio de diversos ecosistemas. Prieto et al. (2012) mostraron los efectos de diversos sistemas agroforestales sobre el porcentaje de micorrización en raíces de cacao. En los resultados obtenidos en nuestro estudio se alcanzó 96 % de micorrización en el cultivo de Cacao + Especies Forestales y Policultivo y finalmente alcanzaron 94 % de micorrización en raíces del cacao.

3.2. Correlación de las concentraciones de cadmio y sistemas agroforestales en el cultivo de cacao

- Suelo

Se desarrolló la prueba de comparación de Duncan, mostrando variaciones significantes entre Cultivo de cacao + Policultivo y el resto de variables (Tabla 3). Los valores obtenidos están dentro de rango de 0,61 – 0,79 ppm de cadmio en suelo, siendo el T3 el que presentó la menor concentración de este metal pesado.

Tabla 3. Test de Duncan para la concentración de cadmio en muestras de suelo raíces, hojas y granos del cultivo de cacao

Sitio de estudio	Descripción	Promedio	Prueba de Duncan
SA-CEF	Cacao + especies forestales	0,79	a
CP-CG	Cacao + guaba	0,75	a
T-C	Cacao	0,73	a
SA-CP	Cacao + policultivo	0,61	b

Leyenda: CP: Cedro Pampa, CG: Cacao + Guaba; SA: San Antonio, CEF: Cacao + especies forestales; CP: Cacao + Policultivo; T: Tabalosos, C: cacao. *Nota:* La solución suelo se extrajo del cultivo de cacao asociada a diferentes sistemas forestales.

El Ministerio del Ambiente - MINAM (2017), indica que el límite máximo de la aceptación de cadmio que es de 1,4 mg/kg. Tomando en cuenta este límite, los suelos estudiados en este trabajo de investigación están en el nivel permitido de porcentaje de Cd con valor de 0,79 ppm. Mendoza-López et al. (2021) encontraron

que las altitudes de 600 y 800 m.s.n.m. lograron superar los parámetros establecidos de aceptación de cadmio; en tanto los HMA disminuyeron la absorción de metales pesados y evitaron su distribución por toda la planta, especialmente en los granos del cacao. De acuerdo con Oliva et al. (2020) encontraron cadmio en el suelo fue de 1,02 mg/kg y las cantidades de cadmio en las superó el contenido de cadmio en los granos del cacao en 2,85 veces más.

- Raíz

La prueba de Kruskal-Wallis demostró que no hubo variaciones significativas para esta variable ($p > 0,05$). Los valores estuvieron dentro de un rango de 1,0 – 2,5 ppm de cadmio en raíces, presentando el valor más alto el (Cultivo de Cacao + Guaba) (Tabla 4).

Tabla 4. Concentración de cadmio (ppm) en raíces de cacao

Sitio de estudio	Descripción	Concentración de cadmio (ppm) promedio	Significancia
CP-CG	Cacao + Guaba	2,5	NS
SA-CEF	Cacao + Especies forestales	1,0	NS
SA-CP	Cacao + Policultivo	1,2	NS
T-C	Cacao	1,0	NS

Legenda: CP: Cedro Pampa, CG: Cacao + Guaba; SA: San Antonio, CEF: Cacao + especies forestales; CP: Cacao + Policultivo; T: Tabalosos, C: cacao. *Nota:* Se realizó en diferentes sistemas forestales de la provincia de Lamas, San Martín.

Las concentraciones de cadmio en raíces fueron menores, pudiendo estar relacionadas con el porcentaje de colonización micorrízica presentados en estos sistemas agroforestales. De acuerdo con Riopedre-Gálan et al. (2021), las micorrizas controlan el impacto fitotóxico de este metal pesado. Como resultado de esta relación cadmio en suelo y raíces, el valor final puede ser un buen indicador de la presencia de metales pesados en el suelo, ello se debe a la producción de exudados radiculares y el incremento de actividad microbiana. Asimismo, Palao Flores & Saavedra la Torre (2020) encontraron que a mayor dosificación de esporas de los HMA, mayor fue el porcentaje de colonización micorrízica en las raíces.

- Hoja

Se desarrolló la prueba de comparación de Duncan, mostrando diferencias significantes entre (Cultivo de cacao + guaba), (Cultivo de cacao + Policultivo) y (Monocultivo cacao) (Tabla 5). Los valores obtenidos están dentro de rangos de 1,6 – 4,6 ppm de cadmio en hojas, siendo el cacao + guaba el que presentó la mayor concentración de este metal pesado (4,6 ppm).

Tabla 5. Comparación de Duncan para la variable concentración de cadmio en muestras foliares

Sitio de estudio	Descripción	Promedio	Prueba de Duncan
CP- CG	Cacao + Guaba	4,6	a
SA-CEF	Cacao + Especies forestales	2,8	ab
SA-CP	Cacao + Policultivo	1,8	b
T-C	Cacao	1,6	b

Legenda: CP: Cedro Pampa, CG: Cacao + Guaba; SA: San Antonio, CEF: Cacao + especies forestales; CP: Cacao + Policultivo; T: Tabalosos, C: cacao. *Nota:* Se realizó en el cultivo de cacao asociada a diferentes sistemas forestales.

Estos resultados son semejantes a lo estudiado por Gramlich et al. (2017) indicando que en los sistemas agroforestales, las hojas de cacao tienen una concentración de cadmio más baja, debido a la competencia de absorción del metal pesado entre las diversas especies vegetales. En tanto, Vallejos-Torres et al. (2021) también encontraron efectos positivos de los HMA contra el cadmio en plántones de cacao en vivero. Asimismo, el uso de microorganismos resultó en una reducción sustancial en los niveles de Cd, con el cacao

de las provincias de Esmeraldas y Manabí experimentando reducciones de 63,25% y 58,20%, respectivamente (Cortez et al., 2024).

- Granos de cacao

Sin embargo, en la Tabla 6 se puede observar que las variables Cacao + Guaba y Cacao + Policultivo muestran la mayor concentración de cadmio en granos de cacao, mostrando valores de 0,74 y 0,76 ppm de cadmio respectivamente.

Tabla 6. Concentración de cadmio (ppm) en granos de cacao

Sitio de estudio	Descripción	Concentración de cadmio (ppm) promedio	Significancia
CP-CG	Cacao + Guaba	0,74	NS
SA-CEF	Cacao + Especies forestales	0,43	NS
SA-CP	Cacao + Policultivo	0,76	NS
T-C	Cacao	0,45	NS

Nota: Se realizó en diferentes sistemas forestales de la provincia de Lamas, San Martín.

La planta de cacao tiene una capacidad excepcional para extraer, transportar y acumular cadmio en sus frutos (Gramlich et al., 2018). Estudios realizados por Engbersen et al. (2019) y Oliva et al. (2020) confirman que específicamente los granos de cacao pueden llegar a acumular una mayor concentración de cadmio. Teniendo en cuenta que los niveles máximos de concentraciones de cadmio en grano de cacao son de 0,5 mg/kg (Contreras et al., 2011; Tantalean Pedraza & Huauya Rojas, 2017), con el mayor grado de acumulación en granos, seguido por la cáscara de frutos y las hojas. Analizando los resultados de la investigación, es notable que la variable cacao + policultivo presentó mayor acumulación de cadmio en el suelo y granos (0,76 ppm). Por otro lado, la variable cacao + especies forestales mostró el menor valor de cadmio en granos (0,43 ppm) por debajo del límite establecido. Esta diferencia observada en relación de almacenamiento de cadmio en los granos de cacao, se debe a una mayor diversificación de especies forestales asociadas al cultivo de cacao. Se ha estudiado que las especies vegetales proporcionan una adición de materia orgánica, incrementan el nitrógeno en el suelo, reducen la pérdida de suelo, aumentan la biomasa radicular, incrementan las sustancias promotoras de crecimiento y asociaciones microbianas (Iglesias, 2011). Es así como las especies asociadas al cultivo de cacao pueden afectar la imbibición de cadmio de los suelos, disminuyendo la cantidad acumulado en los diferentes órganos vegetativos (Gramlich et al., 2018; Argüello et al., 2019).

3.3. Correlación entre la colonización micorrízica y las características del suelo (pH, materia orgánica y fósforo) en plantaciones de cacao

Los valores del coeficiente de correlación de Pearson en la Tabla 7 indican la relación entre las variables, siendo los valores inferiores a 0,5 indicativos de medio a bajo grado de relación. El porcentaje de colonización micorrízica en las raíces de cacao es la variable respuesta, mientras que las características fisicoquímicas del suelo (pH, materia orgánica y fósforo) son las variables independientes.

Tabla 7. Valores del coeficiente de correlación de Pearson para porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao

Variable independiente	% Colonización micorrízica
pH	0,464
Materia orgánica (MO)	-0,013
Fósforo (P)	-0,424

Nota: Hay correlación entre las variables de porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao y las variables edáficas (pH, materia orgánica y fósforo)

Las variables de pH del suelo tienen una correlación media positiva con el grado de colonización micorrízica ($r = 0,464$). Sin embargo, muestra una correlación media negativa entre la cantidad de fósforo presente en el suelo, lo cual significa que, una menor concentración de fósforo (P) en el suelo, las raíces de cacao, presentarán mayor existencia de micorrizas ($r = -0,424$). Oliva et al. (2020) concluyeron que la gran mayoría de las fincas superan los índices establecidos de Cd para la aceptación de comercialización de cacao. Trabajos similares realizados en el cultivo de sacha inchi, mostró una correlación moderada positiva ($r = 0,57$) entre el grado de colonización micorrízica (%) y el pH del suelo (De La Sota Ricaldi, 2023). Además, según Shahid et al. (2016), el impacto de la materia orgánica en las propiedades del suelo puede reducir indirectamente la biodisponibilidad del cadmio. Los sistemas agroforestales en el cultivo de cacao tienen efecto positivo en el reciclaje de materia orgánica, el cual va estimular biológicamente a la planta; además, generan grandes cantidades de biomasa, además de servir como almacén de CO_2 y eficientes liberadores de oxígeno, también promueven nichos ecológicos para una gran variedad de especies vegetales y animales (Ruiz Erazo, 2014); además, contribuyen a la conservación del suelo porque agregan materia orgánica a través de la hojarasca (de cacao y especies de sombra) (Sánchez & Dubón, 2014).

3.4. Correlación de Pearson para la concentración de cadmio en el suelo, raíces, hojas y granos de cacao

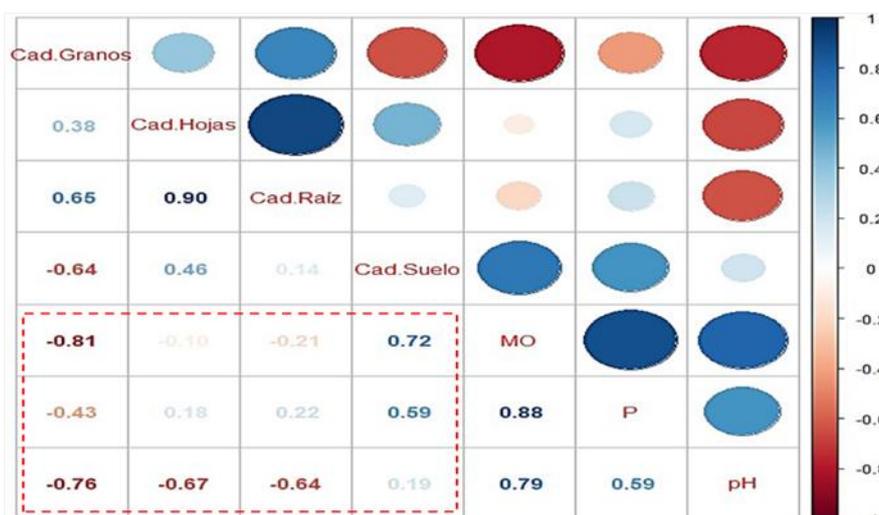


Figura 1. Valores del coeficiente de correlación de Pearson para la concentración de cadmio en el suelo, raíces, hojas y granos de cacao

Nota: Están correlacionadas entre las variables fisicoquímicas del suelo (pH, materia orgánica y fósforo) y la concentración de cadmio en muestras del suelo, raíces, hojas y granos de cacao

Las variables de materia orgánica y cantidad de fósforo en el suelo tienen una correlación positiva moderada a alta con la concentración de cadmio en el suelo (ppm) ($r = 0,72$ y $r = 0,59$). Las variables (cacao + especies forestales) y (monocultivo de cacao), mostraron mayores promedios de materia orgánica de 4,97 y 6,74 % y mayores concentraciones de fósforo de 4,11 y 6,29 ppm. La correlación negativa moderada entre la variable pH del suelo y la concentración de cadmio en las raíces y hojas de cacao (ppm) significa que el pH del suelo tiene una relación inversa con la concentración de cadmio. Se observó que la variable (cacao + guaba) mostró el menor valor promedio en comparación con los demás tratamientos (pH = 5,88) en el pH del suelo y también mayor valor promedio de concentración de cadmio en raíces (2,5 ppm) y hojas (4,6 ppm). Las variables materia orgánica y la cantidad de pH del suelo tienen una correlación negativa moderada a alta con la concentración de cadmio en granos de cacao (ppm) ($r = -0,81$ y $r = -0,76$). Sin embargo, tiene una correlación media negativa con la variable de concentración de fósforo en el suelo (ppm) ($r = -0,43$). Se encontraron que para la correlación negativa moderada y media se observó que la

variable (cacao como monocultivo) alcanzó mayores valores de pH, materia orgánica (%) y fósforo en el suelo (pH: 7,12, 6,74 % MO y 6,29 ppm P).

Pérez Moncada et al. (2019) confirmaron el mejoramiento del desarrollo vegetativo a la planta de cacao con la inoculación de estos HMA, también solucionaron el estrés producido por los metales pesados. La acidez del suelo promueve que el cadmio este presente en la fracción ácida soluble del suelo; mientras que en condiciones alcalinas disminuye la movilidad de este metal (Arévalo-Gardini et al., 2016; Florida Rofner et al., 2018). Por otro lado, una baja concentración de materia orgánica está asociado a una alta fijación de cadmio por las especies vegetales (Argüello et al., 2019; Gramlich et al., 2017).

CONCLUSIONES

El porcentaje de colonización micorrízica y las características del suelo lograron una correlación media positiva en la variable pH del suelo y una correlación media negativa con la variable concentración de fósforo y materia orgánica en el suelo. El uso de las micorrizas es una alternativa económica y ecológica para la producción del cultivo del cacao permitiendo incrementar su rendimiento y a la vez minimiza la absorción y traslocación del cadmio, por otra parte, el uso de sistemas agroforestales con el cultivo cacao amortiguan la fitotoxicidad por parte del cadmio, lo cual es una buena práctica agroforestal para la producción sostenible de este cultivo.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

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

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Stefany Solsol-Salis

Curación de datos: Stefany Solsol-Salis

Análisis formal: Stefany Solsol-Salis

Investigación: Stefany Solsol -Salis

Metodología: Stefany Solsol-Salis

Supervisión: Geomar Vallejos-Torres

Validación: Geomar Vallejos-Torres

Redacción - borrador original: Stefany Solsol-Salis

Redacción - revisión y edición: Geomar Vallejos-Torres

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of The Total Environment*, 605-606, 792-800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma Cacao* l.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide

- survey in Ecuador. *Science of The Total Environment*, 649, 120-127.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>
- Behrooz, A., Vahdati, K., Rejali, F., Lotfi, M., Sarikhani, S., & Leslie, C. (2019). Las micorrizas arbusculares y las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas alivian el estrés por sequía en el nogal. *Hortscience*, 54, 1087–1092.
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. (1995). *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture* (1.^a ed.). Pirie Printers, Canberra, Australia.
- Contreras, F., Herrera, T., & Izquierdo, A. (2011). Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en suelos de Barlovento, estado de Miranda. *Revista Venesuelos*, 13(1), 52 – 63.
- Cortez, L. H. V., Vásquez, K. E. A., Flor, F. G. I., Chang, J. F. V., Maddela, N. R., & Prasad, R. (2024). Banana and apple extracts with efficient microorganisms and their effect on cadmium reduction in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *Discover Food*, 4(1), 163. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00205-5>
- De La Sota Ricaldi, A. M. (2023). *Identificación molecular de hongos micorrízicos arbusculares asociados al sachá inchi (Plukenetia volubilis L.) en la región San Martín* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5629>
- 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>
- EPA, U. S. (1996). *Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils*. Washington, DC.
- Ferrol, N., Tamayo, E., & Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *Journal of Experimental Botany*, 67(22), 6253-6265. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw403>
- Florida Rofner, N., Claudio Melchor, S. L., & Gómez Bernal, R. (2018). El ph y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) en Leoncio Prado, Huánuco, Perú. *Folia Amazónica*, 27(1), 1-8. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.438>
- Gonzales, M. A. (2023). Estudio verifica altas concentraciones de cadmio en cacao cultivado en el norte del Perú. *INTOBAE*. <https://www.infobae.com/peru/2023/10/08/estudio-verifica-altas-concentraciones-de-cadmio-en-cacao-cultivado-en-el-norte-del-peru/>
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M., & Schulin, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of The Total Environment*, 580, 677-686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment*, 612, 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>
- Hu, Y., Pandey, A., Wu, X., Fang, P., & Xu, P. (2022). El papel de los hongos micorrízicos arbusculares en la tolerancia a la sequía en cultivos de leguminosas: una revisión. *Legume Research*, 1(9).
- Ibarra Ramos, R. E. (2022). *Perspectivas para la biorremediación de suelos contaminados con plomo en Colombia* [Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca]. <https://repositorio.universidadmayor.edu.co/handle/unicolmayor/6515>

- Iglesias, J. M. (2011). Publicación: Sistemas de producción agroforestales. Capacitación y análisis en: “conceptos generales y definiciones”. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 151. <https://doi.org/10.22579/22484817.575>
- Irigoin Quintana, V., & Trigo Tuesta, L. P. (2022). *Determinación de la correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo con los contenidos de cadmio y la colonización micorrízica en cacao Theobroma cacao L. como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín, Perú*. [Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://repositorio.ucss.edu.pe/>
- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Efraín Gil-Rivero, A., De La Cruz-Castillo, A. J., & Villena-Zapata, L. (2021). Cadmium in *Theobroma cacao* L. “cacao” plantations in the San Martin region (Lamas), Peru. *Manglar*, 18(2), 169-173. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.022>
- Meter, A., Atkinson, R. J., & Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *SCIOTECA*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1505>
- MINAM. (2017). Compendio de la Legislación Ambiental Peruana. En *Resolución Ministerial N° 182-2017-MINAM*. Ministerio del Ambiente. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/07/Res_182-2017-MINAM.pdf
- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., & Leiva, S. (2020). Cadmium Uptake in Native Cacao Trees in Agricultural Lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, 10(10), 1551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>
- Palao Flores, S. J., & Saavedra la Torre, K. A. (2020). *Efectos de Hongos Micorrízicos Arbusculares para recuperación de suelos agrícolas bajo condiciones de vivero, en la EEA El Porvenir, 2020* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63801>
- Pérez Moncada, U. A., Ramírez Gómez, M. M., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolón, A. M., Wilches Ortiz, W. A., Ramírez, L., & Rengifo Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Revista Terra Latinoamericana*, 37(2), 121. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-168. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Prieto, O., Belezaca, C., Mora, W., Garcés, F., Sabando, F., & Cedeño, P. (2012). Identificación de hongos micorrízicos arbusculares en sistemas agroforestales con cacao en el trópico húmedo ecuatoriano. *Agronomía mesoamericana*, 23(2), 233-239. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v23n2/a02v23n2.pdf>
- Riopedre-Gálan, T., Delgado-Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., & Cartaya-Rubio, O. E. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4), 14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193270002014>
- Rodríguez-Morelos, V. H., Soto-Estrada, A., Pérez-Moreno, J., Franco-Ramírez, A., & Díaz-Rivera, P. (2014). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the rhizosphere of seedlings and mature trees of *Swietenia macrophylla* (Magnoliophyta: Meliaceae) in Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 87(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40693-014-0009-z>
- Ruiz Erazo, X. A. (2014). *Diversidad genética de cacao theobroma cacao l. con marcadores moleculares microsatélites* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75268>

- Sánchez, J., & Dubón, A. (2014). *Informes técnicos*. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola - FHIA. <https://fhia.org.hn/?s=Informe+técnico>
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., & Antunes, P. M. C. (2016). Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System. En *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (pp. 73-137). https://doi.org/10.1007/398_2016_8
- Shi, N.-N., Gao, C., Zheng, Y., & Guo, L.-D. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungus identity and diversity influence subtropical tree competition. *Fungal Ecology*, 20, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2015.12.007>
- Tantalean Pedraza, E., & Huauya Rojas, M. Á. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 1(2), 69-78. <https://doi.org/10.25127/aps.20172.365>
- Tedersoo, L., Bahram, M., & Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 367(6480). <https://doi.org/10.1126/science.aba1223>
- 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>
- Wang, F. (2017). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(20), 1901-1957. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1400853>
- Wu, Q.-S., & Zou, Y.-N. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Drought Stress in Plants. En *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (pp. 25-41). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_2