

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



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

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES

Vilma Irigoin Quintana

Leidy Patricia Trigoso Tuesta

ASESOR

Geomar Vallejos Torres

Rioja, Perú

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS**Datos de los Autores****Autor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 3

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 4

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos de los Asesores**Asesor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Asesor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Datos del Jurado

Presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la Obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

***Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesauro).**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 027 - 2022/UCSS/FIA/DI

Siendo las 10:00 a. m. del día 16 de julio de 2022 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. José Luis Rodríguez Núñez | presidente |
| 2. Manuel Antonio Trelles Velasco | primer Miembro |
| 3. Jorge Alberto Torres Valles | segundo Miembro |
| 4. Geomar Vallejos Torres | asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Determinación del cadmio y colonización micorrízica en plantaciones de "cacao" *Theobroma cacao* L. como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la Región San Martín, Perú** que presentan las bachilleres en Ciencias Ambientales, **Vilma Irigoín Quintana y Leidy Patricia Trigoso Tuesta** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **SUFICIENTE** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO** de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 16 de julio de 2022.



José Luis Rodríguez Núñez
PRESIDENTE



Manuel Antonio Trelles Velasco
1° MIEMBRO



Jorge Alberto Torres Valles
2° MIEMBRO



Geomar Vallejos Torres
ASESOR

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a Dios, por ser mi inspiración y mi fuerza en este proceso de mi vida.

A mi papá Bernardino Trigoso Chávez, por ser el apoyo fundamental en mi vida y formación académica.

A mi mamá María Cruz Tuesta López, por forjarme con valores y principios, que me guía y me bendice desde el cielo.

A Neil, por estar siempre conmigo apoyándome y dándome ánimos para lograr este deseo tan anhelado.

A mis adorados hijos (Fabián y Elif), por ser mi motivación para nunca darme por vencida y ser un ejemplo para ambos.

A mis hermanos (Lola, Susana, José, Milagros) y especialmente a mi hermana María por ser una segunda madre para mí.

Leidy Patricia Trigoso Tuesta

DEDICATORIA

A Dios padre poderoso, quien es mi fortaleza, paz, amor, salud, sabiduría y fuerza de ese modo cumplir mi meta trazada.

A mi Papá, José Baltazar por ser mi soporte, aquella persona que confió en mí y con toda su humildad y sencillez me ha brindado sabios consejos de la vida, junto a ello, el regalo más preciado mi educación.

A mi mamá, Felicita, quien me ha guiado y bendecido desde el cielo.

A mis hermanos (Segundo, Santos, Lucas, Lucila, Julia, Dominga, Zoila y Rosa) por ser mi impulso, por aquella motivación brindada y apoyo absoluto en cada momento difícil.

A mi amado hijo, Vilam André, eres mi orgullo y mi gran motivación, eres aquella inspiración para seguir adelante y ofrecerte cada día lo mejor, eres la luz de mi vida.

A Elferez, mi compañero de vida, por su paciencia y amor, por ser parte de mis logros profesionales, por el apoyo y ánimos que me ha brindado para poder cumplir mis metas y objetivos.

A mi entrañable tía Consuelo, por su preocupación constante y consejos brindados, por ser aquella amiga incondicional y bondadosa.

A la docente, Dalmith Rivero Lozano, quien fue la primera maestra de infancia quien me enseñó con amor y a pesar de mis errores siempre me brindó confianza y paciencia infinita.

Vilma Irigoin Quintana

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, salud para lograr alcanzar esta meta.

A mis padres y hermanos, por el apoyo que brindan en este trabajo.

A mi pareja por ser un soporte y apoyo, en este deseo tan anhelado, a mis hijos por ser mi fuerza e inspiración para lograr todos mis objetivos.

A mi asesor por siempre estar apoyándome en la elaboración de este proyecto de tesis.

Al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT) por financiar el presente trabajo de investigación en el marco del proyecto “Biorremediación con micorrizas arbusculares nativas en el control del cadmio de clones de *Theobroma cacao* como estrategia sostenible a la seguridad alimentaria ecológica en la amazonia peruana”, según contrato N° 105-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV.

Leidy Patricia Trigoso Tuesta

En primera instancia agradezco a Dios, por darme salud y vida, por bendecirme cada día.

A mi papá, José Baltazar por ser un ejemplo de perseverancia y enseñarme que todo esfuerzo tiene su recompensa.

Agradezco de manera infinita a mi familia, que se preocupó y demostró con acciones llenas de bondad, amor incondicional y apoyo desmedido, les agradezco de todo corazón cada acción por mi pensando en mi bienestar y apoyarme a cumplir mis objetivos.

De manera especial agradecer a mi tía Consuelo Irigoin y a mi prima Lilly Chumacero Irigoin, por su gran amor y por compartir el calor de un hogar en todo el tiempo que estuve lejos de mi papá y hermanos.

A mis amigos(as) quienes fueron aquella chispa de color y alegría en los momentos grises de mi vida.

A la docente Mery Amelia Villegas Valle y a sus hijas Grace y Melissa, por el apoyo emocional durante mi formación universitaria e incluirme parte de su familia.

Mi agradecimiento sincero a mi asesor de tesis, Geomar Vallejos Torres, por estar siempre apoyándome y dar los ánimos para lograr mi meta.

Vilma Irigoin Quintana

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.1.1. Perspectiva internacional	4
1.1.2. Perspectiva nacional	9
1.2. Bases teóricas especializadas	11
1.2.1. Origen del cacao.....	11
1.2.2. Antecedentes del registro del cacao	12
1.2.3. Fenología del cultivo de cacao.....	12
1.2.4. Variedades de cacao	13
1.2.5. Condiciones edafoclimáticas para el crecimiento del cacao.....	13
1.2.6. Efectos del cadmio en plantas.....	14
1.2.7. Factores de suelo y cadmio en plantaciones de cacao.....	14
1.2.8. Cadmio en suelos.....	16
1.2.9. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas	16
1.2.10. Micorrizas arbusculares y reducción de cadmio en el cultivo de cacao.....	17
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1. Diseño de la investigación	18
2.2. Lugar y fecha	18
2.3. Población y muestra	20
2.3.1. Población	20
2.3.2. Muestra.....	20
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	20

2.5. Descripción de la investigación	21
2.5.1. Identificación de fincas de cacao	21
2.5.2. Selección de las plantas de cacao para el estudio.....	23
2.5.3. Etiquetado y distribución de las subparcelas de cacao	23
2.5.4. Colecta de muestras de raíces y granos de cacao para cadmio	23
2.5.5. Colecta de muestras de suelo rizosférico para la micorrización	24
2.5.6. Colecta de muestras de suelo para caracterización física-química.....	25
2.6. Identificación de variables y su mensuración	26
2.6.1. Análisis de muestras de suelo para la micorrización.....	27
2.6.2. Análisis de muestras de raíces y granos de cacao para cadmio	30
2.7. Análisis estadístico de datos	32
2.8. Materiales y equipos	32
CAPÍTULO III: RESULTADOS	33
3.1. Correlación y contenido de cadmio en el sistema radicular, granos de cacao y caracterización de suelos	33
3.1.1. Contenido de cadmio en el sistema radicular y caracterización de suelos	33
3.1.2. Contenido de cadmio en granos de cacao y caracterización de suelos.....	34
3.2. Micorrización y caracterización de suelos.....	36
3.2.1. Colonización y caracterización de suelos en plantaciones de cacao	36
3.2.2 Longitud de micelio y caracterización de suelos en plantaciones de cacao	37
3.3. Correlación de la micorrización y contenidos de cadmio.....	39
3.3.1. Correlación de la colonización micorrízica y contenidos de cadmio	39
3.3.2. Correlación de la longitud de micelio y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao establecido como monocultivo	39
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	42
4.1. Correlación y contenido de cadmio en el sistema radicular, granos de cacao y caracterización de suelos	42
4.1.1. Contenido de cadmio en el sistema radicular y caracterización de suelos	42
4.1.2. Contenido de cadmio en granos de cacao y caracterización de suelos	44
4.2. Micorrización y caracterización de suelos.....	45
4.2.1. Colonización y caracterización de suelos en plantaciones de cacao	45
4.2.2. Longitud de micelio y caracterización de suelos en plantaciones de cacao	47
4.3. Correlación de la micorrización y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao...48	

4.3.1. Correlación de la colonización micorrízica y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao.....	48
4.3.2. Correlación de la longitud de micelio y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao establecido como monocultivo	49
CAPITULO V: CONCLUSIONES	51
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS	55
TERMINOLOGÍA.....	69
APÉNDICES	71

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Ubicación y caracterización de las parcelas de cacao</i>	22
Tabla 2. <i>VARIABLES evaluadas en plantaciones de cacao como monocultivo</i>	22
Tabla 3. <i>Correlación de Pearson entre el contenido de cadmio en raíces y las principales características de los suelos</i>	33
Tabla 4. <i>Correlación de Pearson entre el contenido de cadmio en granos y las principales características de los suelos</i>	35
Tabla 5. <i>Correlación de Pearson entre la colonización micorrízica y las principales características de los suelos de plantaciones de cacao</i>	36
Tabla 6. <i>Correlación de Pearson entre la longitud de micelio y las principales características de los suelos de plantaciones de cacao estudiados</i>	38
Tabla 7. <i>Correlación de Pearson entre la colonización micorrízica y contenido de cadmio en raíces y granos de cacao estudiados</i>	39
Tabla 8. <i>Correlación de Pearson entre la longitud de micelio y contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao estudiados</i>	40

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Ubicación de las parcelas muestreadas.....	20
<i>Figura 2.</i> Identificación de parcelas para el estudio de cacao.....	22
<i>Figura 3.</i> Etiquetado y diseño de las subparcelas de cacao.	23
<i>Figura 4.</i> Colecta de raíces y granos en plantaciones de cacao.	24
<i>Figura 5.</i> Colecta de muestras de suelo rizosférico para la evaluación micorrízica	25
<i>Figura 6.</i> Colecta de suelos para caracterización (análisis de suelos) en plantaciones de cacao.....	26
<i>Figura 7.</i> Preparación de material biológico y evaluación de la colonización micorrízica.....	29
<i>Figura 8.</i> Preparación de material biológico y evaluación de la longitud de micelio.	29
<i>Figura 9.</i> Muestreo del sistema radicular en plantaciones de cacao.	29
<i>Figura 10.</i> Contenido de cadmio en raíz en los cuatro sistemas de producción de cacao.....	34
<i>Figura 11.</i> Contenido de cadmio en granos en los cuatro sistemas de producción de cacao.....	36
<i>Figura 12.</i> Colonización micorrízica en los cuatro sistemas de producción de cacao.	37
<i>Figura 13.</i> Longitud de micelio extraradicular en los cuatro sistemas de producción de cacao.....	39
<i>Figura 14.</i> Correlación de la colonización micorrízica en relación al contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao.	40
<i>Figura 15.</i> Correlación del micelio en relación al contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao.....	41

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Mariscal Cáceres.	71
Apéndice 2. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de El Dorado.....	72
Apéndice 3. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Lamas	69
Apéndice 4. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Rioja.	74
Apéndice 5. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Mariscal Cáceres.	75
Apéndice 6. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de El Dorado.....	76
Apéndice 7. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Lamas.	76
Apéndice 8. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Rioja.	77
Apéndice 9. Análisis de caracterización de suelos en plantaciones de cacao como monocultivo.	78
Apéndice 10. Base de datos de análisis de cadmio en raíces y granos de plantaciones de cacao como monocultivo.....	80
Apéndice 11. Base de datos de colonización y micelio micorrízica en plantaciones de cacao como monocultivo.	81
Apéndice 12. Base de datos de caracterización (Análisis de suelos) en plantaciones de cacao como monocultivo.	82

RESUMEN

En el presente estudio se demostró la correlación de las principales propiedades físicas y químicas del suelo con los contenidos de cadmio y la colonización micorrízica en plantaciones cacao establecido como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín, Perú. El estudio se inició con la identificación y georreferenciación de parcelas de clones de cacao (CCN-51 e ICS-39) en un sistema de monocultivo establecido entre 9 a 12 años de edad y ubicadas en cuatro pisos altitudinales (329, 532, 702 y 905 m s.n.m.), de los sectores de Juanjuicillo, Alto Roque, Oriente Nuevo y Mishquiyacu ubicado en las provincias de Mariscal Cáceres, El Dorado, Lamas y Rioja. Se colectaron 500 g de suelo rizosférico para colonización y micelio micorrízica; asimismo, 2000 g de suelo y 1500 g de cacao en baba a partir de frutos maduros de la parte media del árbol para los análisis de cadmio. Se estimaron variables como contenido de cadmio en el sistema radicular y granos de cacao, pH, materia orgánica, fósforo, potasio, arcilla y cationes intercambiables disponibles. Asimismo, se determinaron la colonización y micelio de las micorrizas presentes. Se estableció un diseño no experimental, del tipo de investigación descriptiva y correlacional. Los valores cuantitativos como grado de colonización, contenido de cadmio y características de los suelos se determinaron por la prueba de rango múltiple de Tukey, con una probabilidad de error del 5 %. Todos los análisis fueron realizados empleando el lenguaje de programación R versión 4.0.2. El Cd en el sistema radicular de plantaciones de cacao mostró con el pH una correlación positiva y significativa. Asimismo, el Cd a niveles altitudinales de 329 y 532 m s.n.m, fueron significativamente más altos cuyos valores fueron 1,87 y 1,34 mg.kg⁻¹, respectivamente y el Cd en granos de cacao fueron más altos a 532 y 905 m s.n.m, con 1,80 y 1,65 mg.kg⁻¹, respectivamente. La colonización a altitudes de 702 y 905 m s.n.m, fueron significativamente más altos con valores de 71,32 y 71,44 % y la longitud de micelio a altitudes de 702 y 905 m s.n.m, con valores de 14,58 y 14,77 cm, respectivamente; asimismo, se encontró que la colonización y longitud de micelio se reduce cuando aumenta el nivel de cadmio en el suelo rizosférico. Se concluyó que el nivel de cadmio en raíces y semillas de *T. cacao* para algunas parcelas superaron el límite máximo permisible, generando preocupación para la salud humana.

Palabras Clave: *Micorrizas arbusculares, monocultivo, pisos altitudinales, rizósfera, simbiosis micorrízica, sistema suelo-planta, suelo Contaminado*

ABSTRACT

In the present study, the evolution of the main physical and chemical soil properties with cadmium contents and mycorrhizal colonization in cocoa plantations established as monoculture in different altitudinal floors of the San Martín region, Peru, will be broken. The study began with the identification and georeferencing of plots of cocoa clones (CCN-51 and ICS-39) in a monoculture system established between 9 and 12 years of age and located in four elevational floors (329, 532, 702 and 905 m.a.s.l), from the sectors of Juanjuillo, Alto Roque, Oriente Nuevo and Mishquiyacu located in the provinces of Mariscal Cáceres, El Dorado, Lamas and Rioja. 500 g of rhizospheric soil were collected for colonization and mycorrhizal mycelium; also, 2000 g of soil and 1500 g of cocoa slime from ripe fruits of the middle part of the tree for cadmium analyzes. Variables such as cadmium content in the root system and cocoa beans, pH, organic matter, potassium phosphorus, clay and available exchangeable cations were estimated. Likewise, the colonization and mycelium of the mycorrhizae present were determined. A non-experimental design was established, of the descriptive and correlational type of research. Quantitative values such as degree of colonization, cadmium content and soil characteristics were determined by Tukey's multiple range test, with a probability of error of 5 %. All analyzes were carried out using the programming language R version 4.0.2. The Cd in the root system of cocoa plantations showed a positive and significant correlation with the pH. Likewise, the Cd at elevational levels of 329 and 532 m a.s.l, were significantly higher whose values were 1,87 and 1,34 mg.kg⁻¹, respectively, and the Cd in cocoa beans were higher at 532 and 905 m a.s.l, with 1,80 and 1,65 mg.kg⁻¹, respectively. Colonization at altitudes of 702 and 905 m a.s.l, were significantly higher with values of 71,32 and 71,44 % and the length of mycelium at elevations of 702 and 905 m a.s.l, with values of 14,58 and 14,77 cm, respectively; Likewise, it was found that the colonization and length of mycelium is reduced when the level of cadmium increases in the rhizospheric soil. It was concluded that the cadmium level in roots and seeds of *T. cacao* for some plots exceeded the maximum permissible limit, generating concern for human health.

Key Words: *Arbuscular mycorrhizae, monoculture, altitudinal floors, rhizosphere, mycorrhizal symbiosis, soil-plant system, Contaminated soil.*

INTRODUCCIÓN

La contaminación con Cd en suelos de cultivos alimentarios muestra una preocupación ambiental crítica, ya que deteriora la calidad del suelo y crea una amenaza a la seguridad alimentaria y por ende a la salud humana (Bali *et al.*, 2020). En general los metales pesados encontrados en las almendras de cacao representan una amenaza para los cacaocultores (agricultores que cultivan el cacao). En consecuencia, los límites tolerables de Cd son ahora regulados para especies de cultivos (Hoseini y Zargari, 2013). El estudio en los clones de cacao desarrollados, constituye una de las capacidades innatas de absorber o tomar niveles bajos de Cd de los suelos y la investigación de Cd-cacao en sitios específicos podrían contribuir a acortar la transmisión trófica de Cd (Maddela *et al.*, 2020). La fitotoxicidad de los metales pesados se manifiesta principalmente en suelos ácidos, afecta el crecimiento y la formación de raíces laterales y secundarias de las plantas (Tadeo y Gómez-Cadenas, 2008).

Uno de los metales más peligrosos en el mundo es el cadmio (Cd), este metal está presente en los vegetales y que ha generado preocupación en la población mundial tanto para plantas como para animales (Hoseini y Zargari, 2013). Si bien los suelos a menudo contienen niveles de metales pesados, la industrialización se ha incrementado, lo cual conduce a una mayor contaminación provocada por el hombre como consecuencia de actividades mineras o contaminación por humo (Jung y Thornton, 1996). El cadmio es relativamente móvil en el suelo - sistema vegetal (Chavez *et al.*, 2015).

La región San Martín no es la excepción, pues existe evidencias de la presencia de cadmio en plantaciones de cacao; por lo tanto, es necesario identificar los factores que rigen la acumulación de Cd en suelos, raíces y granos de cacao y encontrar medidas para reducir su concentración (Gramlich *et al.*, 2018). En la Amazonía peruana también se ha encontrado valores altos de cadmio; tal es así que, en fincas de cacao de Bagua, región Amazonas, se excedieron los límites máximos permisibles establecidos por la legislación peruana y europea (Oliva *et al.*, 2020). En Lamas, San Martín, superaron los límites máximos permisibles indicados por la OMS (Mendoza-López *et al.*, 2021). Asimismo, la concentración

media de Cd encontrada en el cacao en polvo de semillas sin fermentar en la región Huánuco fue $2,46 \text{ mg kg}^{-1}$ con un rango de 0,2 a $12,56 \text{ mg kg}^{-1}$ (Zug *et al.*, 2019).

Hoy en día, se necesitan urgentemente técnicas factibles para remediar los suelos contaminados con Cd y con ello; garantizar la inocuidad de los alimentos y proteger la salud pública (Guo *et al.*, 2018). Se han investigado varias técnicas de remediación de suelos en experimentos de campo y en ambientes controlados, como el lavado de suelos, la fitorremediación, la solidificación, la estabilización, la excavación y electro remediación; estas técnicas de remediación emplean mecanismos de contención, extracción/eliminación e inmovilización para reducir los efectos de contaminación a través de procesos físicos, químicos, biológicos, eléctricos y térmicos (Liu *et al.*, 2018a). Sin embargo, la mayoría de estas técnicas pueden producir efectos secundarios al aumentar la movilidad de los metales y cambiar las propiedades físico-químicas del suelo.

Ante ello, una alternativa viable para remediar suelos podría ser la aplicación de los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA), ya que se ha demostrado que plantas con presencia de micorrizas son tolerantes a altas concentraciones de este metal, respecto a plantas no micorrizadas (Li *et al.*, 2016). Diferentes estudios han demostrado que la simbiosis HFMA - planta puede disminuir la translocación de metales pesados (MP) en diferentes especies vegetales, lo que significa que el uso de estos hongos podrían ser una herramienta biotecnológica para el manejo de sistemas agrícolas con contaminación por MP (Li *et al.*, 2016). Debido a que, en los HFMA se produce una gran cantidad de micelio, esto les confiere la posibilidad de bioacumulador de metales (Aguirre *et al.*, 2011).

El estudio fue diseñado para determinar el cadmio y la colonización micorrízica presente en los sistemas radiculares de plantaciones de cacao establecido en sistemas de monocultivo en tres niveles altitudinales de la región San Martín.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la correlación entre las principales propiedades físicas y químicas del suelo con los contenidos de cadmio y la colonización micorrízica en plantaciones cacao establecido como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín.

Objetivos específicos

- Estimar el nivel de Cd en el sistema radicular y almendras en plantaciones de cacao establecido como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín.
- Cuantificar la colonización micorrízica y longitud de micelio en plantaciones de cacao establecido como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín.
- Correlacionar la colonización micorrízica con los niveles de Cd en raíces y granos de plantaciones de *T. cacao* establecido como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Perspectiva internacional

Sandoval-Pineda *et al.* (2020) realizaron el estudio “Alta presencia de cadmio (Cd) y la baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a “cacao” (*Theobroma cacao* L.)”. El objetivo fue evaluar la alta presencia de cadmio y su efecto en la baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao en la región de Yacopí, Colombia. La metodología de trabajo fue observacional. Tomaron cuatro árboles como muestra representativa de la parcela, cuyo estado fitosanitario fue sano sin la presencia de enfermedades potenciales como la moniliasis. La edad de plantación fue de siete años con distanciamientos entre planta a planta de 10 m. Los autores extrajeron cuatro muestras del suelo rizosférico tomadas en cada planta del cacao a 15 cm por debajo del suelo para luego juntarlas y tener una muestra representativa de 5 kg de suelo por planta de cacao. Identificaron la concentración de Cd (B-Cd), Cd (A-Cd), nivel de cadmio disponible (Cd-d) y total (Cd-t). La identificación de las micorrizas arbusculares (MA) fue mediante llaves taxonómicas, para la diversidad, riqueza y abundancia micorrízica emplearon muestras de suelo colectados del campo, posteriormente para su multiplicación usaron cultivos trampa. Evaluaron la diversidad alfa y beta para las comunidades de HMA. Emplearon la prueba de rango múltiple Tukey ($\alpha < 0,05$), bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial. Los datos obtenidos lo procesaron con el programa estadístico R versión 3.4.0. Obtuvieron que A-Cd fue significativamente menor en diversidad (11 %), abundancia (21 %) y riqueza (20 %) de morfoespecies de HMA con respecto a B-Cd. Presentaron cinco de siete géneros en común para las dos comunidades de HMA, no obstante, de las 23 morfoespecies descritas cuatro estuvieron en ambas comunidades. Determinaron una baja tasa de recambio y la similaridad entre las comunidades de HMA mediante los estudios de diversidad beta y el ACP. Los autores concluyeron que las especies *Diversispora spurca*, *Rhizoglosum* sp. y

Claroideoglosum etunicatum fueron las que más se presentaron en el trabajo de investigación e indicaron que el comportamiento de las tres especies fue beneficioso para la planta ya que toleran el estrés; por lo tanto, el uso de estas micorrizas podría disminuir el Cd en el suelo. Rask *et al.* (2019) estudiaron las diferencias en la colonización de micorrizas arbusculares y su influencia en la absorción de cadmio en plantas. El objetivo fue determinar las concentraciones de cadmio (Cd) y su efecto en la colonización por micorrizas arbusculares (MA) de las plantas en un invernadero ubicado en Dinamarca. El estudio fue experimental y emplearon seis especies de plantas en macetas con siete niveles de Cd, lo que hizo posible modelar curvas de dosis-respuesta y calcular la CE 50 para cada especie vegetal. Para el medio de crecimiento de plantas mezclaron tierra con vermiculita y arena gruesa 1:1:1 (v/v/v), luego vaciaron las alícuotas de 10 ml de CdCl₂ (Merc) con el medio de cultivo utilizando un mezclador Hercules 6682 (OBH Nordica) hasta obtener concentraciones de 0,35; 1,35; 2,85; 6,65; 16,15; 40,15 y 100,35 mg de Cd por kg de suelo. El medio de crecimiento enriquecido con Cd lo almacenaron en bolsas de plástico durante una semana en invernadero a 20 °C hasta la aclimatación antes de la siembra. Posteriormente, sembraron las plantas en macetas de 10 x 10 x 10 cm³ que contenían 750 g de medio de cultivo. Para su estudio, las raíces y los brotes fueron secadas a 105 °C durante 24 horas, luego la raíz se aclaró con KOH al 10 % y teñido con azul de tripano al 0,05 % de acuerdo con el método modificado por Phillips y Hayman (1970). Los análisis de correlación y regresión lineal fueron realizados en SigmaPlot 13,0 y los análisis de variación en SAS Enterprise Guide 6,1. Algunas variables fueron transformadas logarítmicamente o arcoseno. Los resultados evidenciaron la existencia de un efecto bioprotector de los HMA contra el Cd, ya que la simbiosis redujo la translocación de Cd a los brotes, especialmente en plantas con una colonización de HMA muy alta. Los autores concluyeron que al combinarse diversas especies más la colonización HMA existe un incremento de medida en la absorción de Cd en las plantas. Por lo tanto, propusieron que los HMA deben ser considerados cuando se cultivan plantas en suelos contaminados con Cd.

Restrepo *et al.* (2019) estudiaron la caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo. El objetivo fue identificar los hongos micorrízicos arbusculares que existen en ambientes ganaderos tanto en trópico alto y bajo de Antioquía, Colombia. Es estudio lo iniciaron con la recolección de muestras de suelo

tomadas aleatoriamente en el potrero (10 submuestras) del cual realizaron el análisis físico-químico para ello fue necesario recurrir al uso del equipo de experimentos profesionales y de ese modo realizar un análisis de suelos de acuerdo a un modelo STH-14 cuyo código es 5010-01 con denominación (La Motte Company, MD, USA). Asimismo, se llevó a cabo la identificación de los hongos micorrízicos arbusculares existentes en el suelo y del mismo modo se logró establecer el porcentaje de colonización de los hongos micorrízicos arbusculares presentes en raíz utilizando una decoloración antepuesta a las raíces con una base fuerte de hidróxido de potasio (KOH) al 10 %. Finalmente identificaron los hongos micorrízicos arbusculares basada en el análisis morfológico de las esporas. El estudio fue del tipo observacional y correlacional. En este estudio se logró visualizar las correlaciones entre la densidad de esporas respecto al Calcio (Ca) un valor de -0,659, asimismo para el magnesio (Mg) un valor de -0,715, También para potasio (K) un valor de -0,808, Fósforo (P) con un valor de -0,704, por último para el pH (-0,735) en Magdalena Medio, del mismo modo el porcentaje de colonización por HMA y K se ha obtenido valores de (0,719) ubicado en el Norte de Antioquia. Los autores comprobaron que existe regularidad en el conjunto de datos con base en la prueba de Shapiro- Wilk ($p \leq 0,05$). Los datos han sido analizados estadísticamente el programa cuyo nombre es *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) de versión 22 funcionando en Windows XP. En el estudio se establecieron la existencia en las subregiones evaluadas el género *Glomus* siendo el más abundante en un porcentaje de (75-100 %), del mismo modo se encontró géneros *Acaulospora* spp. y *Gigaspora* spp. En un porcentaje menor ubicado en trópico alto. Por ende, los resultados alcanzados por los investigadores permiten deducir que las condiciones climáticas de los ambientes en estudio y el tipo de pastos predominantes permiten un desarrollo y aumento de una variedad de tipos de micorrizas arbusculares en los diferentes tipos de suelo del mismo modo ofrece mayor relación simbiótica con una variedad de especies de plantas. Por ello, los investigadores han concluido que la especie de *Glomus* presentó mejor ajuste a la variedad de suelos con una gran capacidad de establecer simbiosis con diferentes plantas.

Gramlich *et al.* (2018) investigaron la absorción de cadmio en el suelo por el cacao en Honduras. El objetivo fue determinar la absorción de cadmio en el suelo y los factores que influyen en la movilización a las plantas de cacao en Honduras. En el estudio

emplearon el análisis de regresión múltiple, mediante encuestas desarrolladas en diciembre de 2014 y enero de 2015 en 55 fincas de cacao. Dividieron los sitios aluviales en cuatro grupos geográficos para el análisis de los resultados. En cada finca, seleccionaron dos árboles de cacao con frutos maduros en aleatorio y su ubicación registrada mediante GPS. Recolectaron hojas envejecidas de cada árbol tomando el noveno y décimo hoja de 5 ramas diferentes, contando desde sus puntas. Además, recolectaron frutos maduros, dependiendo de la disponibilidad, de cada árbol. Todos los análisis estadísticos lo elaboraron con el programa R. Mediante la ANOVA junto con la prueba de Tukey HSD; determinaron las diferencias significativas para las propiedades físicas-químicas del suelo y de las plantas entre sus unidades geológicas y geográficas. Los resultados indicaron que los niveles de cadmio en las hojas fueron mayores que en las almendras con una media de $2,6 \pm 0,4 \text{ mg.kg}^{-1}$. Sin embargo, con un promedio de $1,1 \pm 0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Cd en los granos de cacao excedían el límite propuesto por la UE. El contenido de cadmio en granos de cacao mostró diferencias entre sustratos geológicos con variaciones en los suelos. Los resultados presentados indican que la concentración promedio estuvo en el rango de suelos no contaminados ($0,25 \pm 0,02 \text{ mg.kg}^{-1}$). Los autores concluyeron que las diferencias en el Cd del suelo entre los sitios se debieron a variaciones naturales. Asimismo, concluyeron que el Cd del suelo disponible fue el mejor predictor de los niveles de Cd en las almendras de *T. cacao*, las vainas y las hojas muestreados.

Yang *et al.* (2016) estudiaron la composición de la comunidad de hongos micorrízicos arbusculares (MA). El objetivo fue examinar la comunidad de hongos AM en una translocación recíproca de bloques de suelo con vegetación intacta a lo largo de un gradiente altitudinal (3200 a 3800 m) en una pradera alpina en la meseta Qinghai-Tibet, China. En la metodología incluyeron cuatro pisos altitudinales con diferentes comunidades de plantas en un radio de 9 km entre sí. También excavaron doce bloques de suelo intactos (100 cm x 100 cm) de ancho, 30-40 cm de profundidad. Emplearon el análisis bioinformático, mediante el comando Shhh flow en Mothur 1.31.2. De las muestras de subsuelo realizaron el conteo de esporas de hongos MA. Asimismo, extrajeron esporas de hongos MA de 20,0 g de suelo y el ADN genómico lo obtuvieron de 0,5 g de suelo. El análisis estadístico fue mediante un ANOVA de dos vías para examinar los efectos de la elevación original, translocación y su interacción en la densidad

y riqueza de esporas de hongos MA. También utilizaron las pruebas de diferencia significativa honesta (HSD) de Tukey en $P < 0,05$. Los resultados indicaron que la densidad de HMA fue significativamente mayor a menor altura que a mayor elevación independientemente de la translocación, excepto que este parámetro incrementó significativamente por translocación ascendente desde los 3200 m s.n.m. originales a los 3400 y los 3600 m s.n.m. Las unidades taxonómicas operativas (OTU) de los HMA lo obtuvieron utilizando 454-pirosecuenciación de secuencias de rDNA con una similitud de secuencia del 97 %. Al aumentar la altitud, la riqueza de *Acaulosporaceae* y *Ambisporaceae* aumentó, pero la riqueza de *Gigasporaceae* y *Glomeraceae* disminuyó. Los autores concluyeron que la elevación original es una determinante en la configuración de la comunidad de HMA en la pradera alpina de Qinghai-Tibet.

Chavez *et al.* (2015) realizaron el estudio “Concentración de cadmio en granos de cacao y su relación con el cadmio (Cd) en suelos, en el sur de Ecuador”. El objetivo fue determinar la concentración del Cd en las plantas y suelos de cultivos de cacao ubicado al sur de Ecuador. Aplicaron un análisis de regresión escalonada para diferenciar cuáles son las principales propiedades del suelo que contribuyen al Cd disponible en los suelos y captación de Cd por las plantas de cacao. Recolectaron muestras de suelo de 19 fincas a profundidades de 0-5, 5-15, 15-30 y 30-50 cm, no obstante, se adquirió muestras representativas de cuatro plantas contiguas. Asimismo, el Cd total aprovechable y extraíble ha sido evaluado en diferente profundidad del suelo. Los datos fueron procesados mediante un análisis de varianza unidireccional (ANOVA), utilizándose la misma herramienta estadística para calcular la diferencia de Cd entre hojas, frijoles y cáscara en todos los sitios; para ello emplearon el programa JMP (versión 8,0,2; SAS). El Cd recuperable total varió de 0,88 a 2,45 mg.kg^{-1} y 0,06 a 2,59 mg.kg^{-1} en ese orden evaluado en parte superficial y subsuperficial del suelo, a diferencia los valores que oscila para el Cd extraíble ha sido de 0,08 a 1,27 y 0,02 a 0,33 mg.kg^{-1} albergando un valor promedio de 0,40 y 0,10 mg.kg^{-1} . El estudio determinó que el Cd en los diferentes tejidos de cacao se ha reducido de modo siguiente frijoles > cáscara > hojas. La cantidad de cadmio en granos de cacao fluctuó entre 0,02 y 3,00 mg.kg^{-1} de los cuales 12 de 19 sitios poseían un contenido de Cd en el grano por encima del nivel crítico. Los autores concluyeron que la concentración de Cd en el grano estuvo altamente correlacionada con el Cd extraíble con HCl en las profundidades de 0-5 y 5-15 cm.

1.1.2. Perspectiva nacional

Luna *et al.* (2020) investigaron el efecto de la micorriza (*Glomus Intrarradices*), en el rendimiento de dos variedades de “papa” (*Solanum Tuberosum* L.) con el objeto de determinar el efecto de la aplicación de hongo micorrízico, vesículo arbuscular, (*Glomus intrarradices*) como MicorrizaFer, en el rendimiento del cultivo de “papa” (*Solanum tuberosum* L.) en dos variedades Imilla negra y Compis, en condiciones de secano durante la campaña agrícola 2015-2016 en el Altiplano de Puno, Perú. Además, el método del estudio que se utilizó ha sido experimental, descriptivo y secuencial. En lo cual se aplicó cinco cantidades de (1,00; 0,75; 0,50; 0,25 y 0,00) g por planta, cabe mencionar que antes se realizó la inoculación del hongo micorrízico en el tubérculo. No obstante, para la colocación de los tratamientos se utilizó el análisis de Bloque Completo al Azar (BCA), de ese modo los datos han sido analizados de modo factorial 2 x 5, respecto a variedad y cantidad, llevado a cabo con tres repeticiones; lo cual el rendimiento ha sido determinado usando un método gravimétrico. Como resultados obtuvieron mayor rendimiento con la cantidad de 1,00 g de MicorrizaFer por vegetal, 14,01 t.ha⁻¹ en la especie de Imilla Negra, del mismo modo un rendimiento de 13,82 t.ha⁻¹ en la especie de Compis, lo cual fue mayor a la especie patrón 7,02 % y 5,97 % proporcionalmente, ya que no se aplicó fertilización química ni algún control químico para plagas y enfermedades. Los autores concluyeron que las variaciones del contenido de cadmio encontradas en el estudio se atribuirían a la altitud en la que se realizó la investigación; siendo esta de 3820 m s.n.m.

Oliva *et al.* (2020) estudiaron la “absorción de cadmio en árboles nativos de cacao en tierras agrícolas de Perú”. El objetivo fue evaluar las concentraciones de Cd en los suelos de las fincas de cacao y en las raíces, hojas, testa y cotiledón del cacao en Bagua, Perú. Para el análisis, tomaron muestras de suelo agrícola, raíces, hojas y mazorcas de cacao en 29 fincas de cacao, que van desde en edades de 5 a 15 años, ubicados en cuatro distritos de la provincia de Bagua en Amazonas. Las fincas fueron ubicadas en altitudes entre 278 y 1176 m sobre el nivel del mar en un clima cálido tropical. Las muestras de suelo lo recolectaron entre octubre y diciembre de 2017, a una profundidad de 0 a 20 cm. Para cada una de las fincas consideraron una muestra compuesta, junto con 20 submuestras de suelo, que posteriormente lo combinaron y homogeneizaron para obtener una sola muestra adecuadamente representativa del suelo de cada finca. Asimismo, tomaron

muestras de la zona media de la proyección de la copa del árbol de cacao. Utilizaron la correlación de Pearson para determinar la relación entre el Cd del suelo y la planta, y los factores del sitio. Asimismo, utilizaron estadísticas descriptivas como media, mediana, mínimo y máximo. Midieron las concentraciones de Cd en cada una de las muestras y lo correlacionaron con variables seleccionadas en cada sitio de muestreo. Los datos se analizaron con el software estadístico Minitab v.19,1 (Minitab LLC). En el suelo, encontraron concentraciones de Cd que oscilaron entre 1,02 y 3,54 mg.kg⁻¹. Asimismo, determinaron que las concentraciones de este metal oscilaron entre 0,49 mg.kg⁻¹ hasta 2,53 mg.kg⁻¹. También encontraron que las cantidades de Cd en las raíces contenían hasta cinco veces más que los niveles de Cd presente en el suelo y 2,85 veces las cantidades encontradas en las almendras. Los autores concluyeron que las mediciones de la mayoría de las fincas excedieron los límites máximos permisibles establecidos por la legislación

Zug *et al.* (2019) estudiaron la “Acumulación de cadmio en el cacao peruano (*Theobroma cacao* L.) y Oportunidades de Mitigación”. El objetivo fue medir las concentraciones de Cd en cacao en polvo a partir de semillas sin fermentar de 40 árboles diferentes en 20 fincas de la Región Huánuco, Perú. Al mismo tiempo evaluaron las oportunidades para la mitigación en la ciudad de Tingo María (9 ° 17 ' 43 " S, 75 ° 59 ' 51 " W). Seleccionaron al azar 20 fincas de cacao en 13 ubicaciones diferentes de CCN-51 y cacao fino y de sabor. Tal es así que analizaron 40 árboles de estudio en 20 fincas de cacao ubicadas en 13 ubicaciones. Por cada árbol colectaron muestras de semilla separada (30 semillas) a partir de frutos de cacao maduro. Emplearon un diseño del estudio anidado con árboles emparejados en cada finca. La abundancia de cada especie presente lo determinaron con base en la metodología de Braun-Blanquet (1964). Los índices de diversidad lo calcularon utilizando R, versión 3.1.1 con el paquete BiodiversityR (Kindt y Coe 2005). La concentración media de Cd consistió en 2,46 mg.kg⁻¹. El nivel de Cd medido fue del 1,5 mg.kg⁻¹. El uso de nutrientes provocó mayor nivel de Cd en *T. cacao*. Los investigadores concluyeron que los cambios en la fertilización y composición de la planta puede ser medidas prometedoras para contrarrestar la contaminación de Cd en regiones con alta contenido de Cd en el suelo.

Según los investigadores Arévalo-Gardini *et al.* (2016) efectuaron el estudio sobre metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres zonas del Perú. El objetivo del presente estudio fue determinar los contenidos totales de metales pesados cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb), Hierro (Fe), cobre (Cu), zinc(Zn),magnesio(Mn) en los suelos de plantaciones de cacao en las principales áreas de producción del Perú: Zona Norte (Tumbes, Piura, Cajamarca y Amazonas); Zona central (San Martín, Huánuco y Junín) y Zona Sur (Cuzco). Las muestras de suelo lo recolectaron en diferentes profundidades los cuales fueron seis en las siguientes dimensiones (0-5; 5-10;10-20; 20-40; 40-60 y 60-80) cm respectivamente durante los meses de febrero y abril en el 2014. En lo cual para cada muestra se consideró un kilogramo de suelos homogenizados en cada profundidad, adquirido de ocho calicatas a una profundidad máxima de 80 cm repartidas de modo al azar siendo en zigzag para cada plantación. Asimismo, en cada punto de evaluación la hojarasca fue removida antes de la colecta de muestra. Los análisis estadísticos lo realizaron usando InfoStat, versión 2014 (Di Rienzo, 2014). No obstante, fue comparado ante el análisis de varianza (ANOVA) las propiedades físico químicas de los suelos de acuerdo al ámbito de estudio departamento, provincia y profundidad, del mismo modo las medias fueron cotejadas con la prueba Scott y Knott con un nivel de confianza al 95%. Tuvieron resultados positivos para la parte física y química, donde demostraron que fueron suelos adecuados para el cacao, en cuanto a los resultados en metales pesados los autores encontraron que los rangos estuvieron fuera del nivel fitotóxico. Los metales que encontraron en la zona sur como plomo, níquel, manganeso, zinc, hierro fueron de valores menores, en cambio para cobre y cambio fueron valores mayores en la zona norte; generalizando las muestras tuvieron correlación positiva entre el pH, % de arcilla y magnesio con los diferentes niveles de metales pesados. Concluyeron que el metal de cadmio tiene relación positiva con las características química del suelo excepto el plomo, debido a que éste se correlacionó solamente con la CIC y la acidez intercambiable del suelo.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Origen del cacao

El cacaotero (planta o árbol del cacao) que pertenece a la especie *Theobroma cacao* L., tuvo su origen por las selvas neotropicales, mayormente en la cuenca Amazónica y de

forma posible en la meseta Guyanesa (Lachenaud *et al.*, 2007). Los estudios más recientes mencionan que el origen pudo haber sido en la triangular amazónica que comprende entre Ecuador, Colombia y Perú (Motamayor *et al.*, 2008); no obstante, se ha extendido por zonas tropicales y subtropicales de África occidental, Asia sudoriental y Sur América, llegando a adaptarse a las temperaturas de esas zonas (Daymond y Hadley, 2004).

1.2.2. Antecedentes del registro del cacao

Tradicionalmente se ha considerado que el cultivo de cacao está dividido en tres grupos agromorfológicos: (a) Forastero, las cuales tienen mazorcas rugosas, surcos pronunciados, de forma alargada y puntiaguda, de coloraciones verdes y rojizas; (b) Criollo, que se caracterizan por tener mazorcas rugosas, surcos pronunciados, de forma alargada y puntiaguda, de coloraciones verdes y rojizas; y (c) Trinitario, que es el resultado de cruces que se dieron de forma natural entre los criollos y forasteros (Toxopeus, 1985). Desde la Amazonía había una tendencia a separar el cacao Forastero del Bajo Amazonas del Alto Amazonas Forastero. Si bien existe cierta confusión en cuanto al significado de estos nombres en el registro histórico, la industria reconoce a Forasteros como variedades vigorosas con granos de color violeta oscuro con un sabor relativamente amargo y a menudo un sabor ácido (Toxopeus, 1985). Por el contrario, las variedades Criollo son menos vigorosos y producen granos que son blancos o muy ligeramente pigmentado con un fuerte aroma deseable y amargor leve (Toxopeus, 1985). Las variedades Trinitario se pensaba que eran híbridos derivados de polinización libre entre el Forastero del Bajo Amazonas y variedades criollas (Motamayor *et al.*, 2003).

1.2.3. Fenología del cultivo de cacao

La planta arbórea de *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) se desarrolla cerca de los 10 metros de altura, cuyas características son la presencia de hojas en forma puntiaguda u ovalada, también su etapa de influencia se caracteriza por ser una cresta decasiforme que se forma en el tromco más maduro de la planta, asimismo, la flor es unisexual y el fruto es de aspecto grande tipo una mazorca cuya forma es de un elipse u ovalada. Asimismo, cada mazorca puede contener entre 30 a 40 semillas, las cuales presentan una testa gruesa y coriácea (Ministerio de Agricultura y Riegos [MINAGRI], 2016; Batista, 2009).

1.2.4. Variedades de cacao

Uno de los clones que más destacan del cacao es CCN-51 por su resistencia a fitófagos y patógenos, este es de tipo convencional que fue desarrollado en Naranjal perteneciente a la provincia de Guayas del país de Ecuador. Las siglas CCN significa *Colección Castro Naranjal*, y el número 51 es por la intensidad de cruces sucedidos. Anteriormente no era muy conocido, pero cuando los cacaoteros empezaron a cultivar vieron que presentaba una alta producción por hectárea. Este clon presenta una autofecundación o autopolinización; a diferencia de otros clones de cacao que presentan una polinización cruzada. Respecto a su aspecto fitosanitario, es resistente a fitófagos y patógenos, y se adapta a diferentes zonas tropicales. Este clon produce mazorcas después de los dos años debido a su precocidad. Sin embargo, este cacao no es de tipo aroma fino debido a que su sabor es ácido y astringente (International Cocoa Organization [ICCO], 2014). El clon ICS 95 (*Imperial Collage Selection*), es uno de los cultivares de cacao que más existen en el Perú y a la vez es parte de los siete cultivares de origen trinitario, cuya atribución organoléptica es fino de aroma (Alianza Cacao Perú, 2016). Fermentado correctamente los granos de cacao presenta valores de 0 a 2 % de tipo pizarrosos; menores de 35 % para grano parcial o violetas y en marrones iguales al 65 %, si llegase a sobrepasarse estos valores se daría una alta fermentación (Stevenson *et al.*, 1993). En cambio, se menciona que la fermentación de cacao debe exceder del 75 % para granos marrones lo que indica una buena fermentación (Amores *et al.*, 2009). El genotipo CCN-51 está disponible en el Perú y también el ICS-6, sus granos muestran diferencias en sus aromas, mediado por los fermentados realizados a la materia prima para la elaboración de muchos derivados y es requerido en la industria chocolatera (Vargas *et al.*, 2016).

1.2.5. Condiciones edafoclimáticas para el crecimiento del cacao

La planta de cacao se desarrolla en suelos con humedad suficiente, es decir, en suelos con capacidad de campo; plantas de cacao con estrés hídrico generan una reacción fisiológica adversa (Amorim y Valle, 1992; Gonzáles-Huiman, 2008); por ende, cuando está establecido el cultivo en una zona, necesita de lluvias bien distribuidas durante todo el año y al mismo tiempo el suelo debe tener buena distribución de textura para que no haya encharcamiento (Gonzáles-Huiman, 2008). No solo los factores de precipitación,

humedad en el suelo y temperatura regulan el desarrollo y crecimiento del cacao (Sena-Gomes y Kozlowsky, 1987), también las características físicas del suelo como la porosidad y resistencia a la penetración tiene relación con el desarrollo del cacao.

1.2.6. Efectos del cadmio en plantas

Dentro de los metales de transición, el cadmio (Cd) es uno de los más tóxicos cuyos niveles por encima de los máximos permitidos genera efectos nocivos y tóxicos que son negativos en la salud humana, plantas y de todo ser vivo en general. Se estima que alrededor de 30 000 t de Cd al año son soltados al medio ambiente debido a las actividades industriales desarrolladas por el hombre (Järup y Åkesson, 2009). El Cd es un metal pesado tóxico, sus principales fuentes naturales son las erupciones volcánicas, las quemas forestales y el transporte de partículas del suelo por el viento. Por otra parte, la actividad humana tal como la minería, fundición de metales, quema de combustibles fósiles, uso de fertilizantes fosfatados, fabricación de baterías, cemento, pigmentos y plásticos, libera 3-10 veces más Cd al ambiente (Palus *et al.*, 2003).

Los efectos del cadmio son tan tóxicos para las plantas que ocasiona disminución en el crecimiento vegetativo y actividad fotosintética, provocando la disminución del pigmento clorofiliano en las plantas (Huang *et al.*, 2015). No obstante, los síntomas característicos es un amarillamiento o clorosis, lo cual dentro del sistema bioquímico de la planta genera un estrés oxidativo en el ciclo de Krebs (Gimba *et al.*, 2015). Estos tóxicos podrían provocar la muerte de la planta.

1.2.7. Factores de suelo y cadmio en plantaciones de cacao

La pérdida de la riqueza del suelo es considerada como uno de las limitantes y daños ambientales más graves a nivel regional y mundial (Bateman y Muñoz-Rojas, 2019). Perturbaciones antropogénicas como agricultura intensiva, deforestación y malas prácticas de fertilización pueden generar altas tasas de degradación de la tierra y el suelo en forma de compactación del suelo, pérdida de la fertilidad y contaminación, entre otros (Pereira *et al.*, 2017).

Por lo general los contenidos de Cd en los suelos están fuertemente relacionadas con su abundancia en la roca madre. Sin embargo, las actividades o malas prácticas agrícolas pueden incrementar el contenido de Cd en el suelo, superando la capacidad del suelo y generando la translocación del suelo a las partes vegetativas de la planta. Estudios previos sobre plantaciones de cacao en América del Sur mostraron una fuerte relación entre Cd en granos y Cd total del suelo, y se reportó una influencia considerable del pH del suelo en el aumento de Cd disponible en plantas (Ramtahal *et al.*, 2019). La biodisponibilidad del cadmio en los suelos depende de varias variables, incluido el contenido total de metales, el pH, la materia orgánica del suelo (MOS), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y contenido de arcilla (Alloway, 2013). El pH del suelo es particularmente importante ya que controla la solubilidad y movilidad del cadmio en el suelo (y por ende su disponibilidad para las plantas), pH con mayor acidez aumenta la movilidad y solubilidad de este metal y, por tanto, el riesgo de absorción por plantas (Wang *et al.*, 2006). En plantaciones de cacao en Sudamérica, factores de manejo como el uso de fertilizantes, pesticidas, riego y manejo orgánicos (Wickramasuriya y Dunwell, 2018) y la silvicultura, así como la biodiversidad vegetal, se han relacionado con la concentración total de Cd en suelos de plantaciones de cacao y granos de cacao (Meter *et al.*, 2019). Está bien establecido que la agricultura regular, basada en el cultivo a gran escala y en monocultivos a menudo conducen a una degradación significativa de la funcionalidad del ecosistema, lo que afecta procesos reproductivos de polinización y reciclaje de nutrientes (Klein *et al.*, 2007).

Para equilibrar mejor la producción de cultivos y la funcionalidad del ecosistema, varios autores han sugerido enfoques (Ecosistemas, taxonomía, la ecología y la biogeografía) que incluyen la integración de la diversidad biológica en los sistemas agrícolas (Perfecto y Vandermeer, 2010) y evaluación de la función del agroecosistema. Los sistemas agrícolas deben mantener un equilibrio en sus funciones y sus relaciones adecuados entre factores bióticos (microorganismo como bacterial, micorrizas, trichoderma) y abióticos (temperatura, precipitación, pH, arcilla, etc.) (Zhang *et al.*, 2007) que pueden mejorar los servicios del ecosistema. Por lo tanto, el pH del suelo, la materia orgánica y los oligoelementos se han utilizado como indicadores potenciales para evaluar las funciones del agroecosistema (Arévalo-Gardini *et al.*, 2015).

1.2.8. Cadmio en suelos

El suelo es el principal sumidero de metales y actúa como barrera para evitar su entrada en la cadena alimentaria (Yasir *et al.*, 2019). Sin embargo, actividades humanas como la minería y la fundición de metales han transferido gradualmente muchos metales tóxicos de la corteza terrestre al medio ambiente, lo que ha provocado la propagación y contaminación de metales pesados (Sinha *et al.*, 2013).

Se han utilizado diversas técnicas físicas, químicas y biológicas para disminuir metales pesados en suelos contaminados (Yasir *et al.*, 2019). La inmovilización *in situ* generalmente se considera una técnica factible para corregir suelos contaminados de metales debido a su rentabilidad y facilidad de operación (Yang *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2017). Muchos investigadores han informado sobre el uso de diversas enmiendas para inmovilizar el Cd en suelos contaminados, incluidos fosfatos, minerales arcillosos, materiales calcáreos, etc. (Cui *et al.*, 2011). Los microorganismos son materiales vivos con diversas propiedades. Se han investigado algunas bacterias y hongos para remediar suelos y agua contaminados (Yang *et al.*, 2017).

1.2.9. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas

El proceso de simbiosis generado por las micorrizas arbusculares (MA) afecta menor igual a 80 % de los vegetales, la mayoría de las cuales son plantas cultivadas (Wipf *et al.*, 2019). Las Hifas son aquellos HMA que se impregnan en la corteza de la raíz de ese modo logran colonizar la célula de la corteza de ese modo van formando los arbusculos que se conforman de la unión de las hifas fúngicas envuelta en las células corticales que se les llama membrana periarbuscular. Esta interacción permite a las plantas mejorar el uso de los recursos naturales del suelo y responder mejor a las limitaciones abióticas (Lenoir *et al.*, 2016), especialmente cambios climáticos o contaminación por metales pesados (Torres *et al.*, 2018).

1.2.10. Micorrizas arbusculares y reducción de cadmio en el cultivo de cacao

El Cd es un metal peligroso que afecta la producción y calidad del cultivo de cacao. Existen varios métodos para su mitigación en el intercambio del contenido de cadmio, pero en la práctica resultan ser muy costosos y demanda mucho tiempo realizarlo (Qiu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2009).

Muchos estudios demuestran que la interacción de HMA llámese *Glomus hoi*, *Glomus* sp., *Microkamskii* sp., *Claroideolomus etunicatum* y *Microkamskii peruviana* con plantas, pueden mitigar la absorción de metales pesados en muchas especies agrícolas o vegetales, lo que da entender que conformaría parte de una herramienta biotecnológica para manejar diversos sistemas agrícolas contaminados por metales pesados (Aguirre *et al.*, 2011; Vallejos-Torres *et al.*, 2022). Algunos seres vivos como las plantas producen metabolitos secundarios y entre ellos están estos hongos que segregan una glicoproteína denominada glomalina. Investigaciones indican que la glomalina inmoviliza menor a 1 % al cadmio en la solución suelo; siendo este una barrera protectora ante la acumulación del Cd en la planta (González-Chávez *et al.*, 2004). Esto es ocasionado por la excesiva cantidad de micelio de los HMA, lo que posibilita la acumulación de Cd en el sistema radicular de las plantas (Aguirre *et al.*, 2011).

Cabe mencionar que los estudios sobre las micorrizas se remonta al año 1831 donde Vittadini publicó sus observaciones sobre la manera en que diferentes especies de trufas en Europa, se asociaban con las raíces de algunas especies de encinos (*Quercus* sp.) y otras plantas vasculares hasta que en 1842. Vittadini mencionó que estas pequeñas raíces eran nutridas por las hifas del hongo *Elaphomyces*. Confirmando que desde esa época se realizaron las primeras observaciones y aplicaciones de micorrizas.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

El presente estudio muestra un diseño no experimental, tal como lo detalla los autores Ato *et al.*, (2013), donde hace mención que no aplica el uso de variables manipuladas. Las variables de medición tales como contenidos de Cd en raíces y granos de *T. cacao*, colonización, micelio y caracterización de suelos se observaron y midieron tal como se encontraron en su ambiente natural que luego fueron analizados de acuerdo a los datos tomados en un momento y tiempo único. De acuerdo a las investigaciones está enmarcado dentro del tipo de investigación descriptiva y correlacional; tal como lo indican Sousa *et al.*, (2007), para descubrir nuevos hechos científicos, basados en la relación entre la micorrización y contenido de cadmio en plantaciones de cacao como monocultivo en cuatro pisos altitudinales de la región San Martín.

2.2. Lugar y fecha

El presente estudio de investigación se ejecutó entre los meses de noviembre de 2020 a abril de 2021. Las cuatro áreas de producción de cacao fueron de aproximadamente 2500 m², ubicada en las provincias de Mariscal Cáceres, El Dorado, Lamas y Rioja dentro de la región San Martín (Figura 1), con altitudes de 329, 532, 702 y 905 m s.n.m. respectivamente.

En la provincia de Mariscal Cáceres se consideraron parcelas próximo al distrito de Juanjuí; específicamente en el sector Juanjuicillo en la margen izquierda de Juanjuí. La accesibilidad desde Tarapoto es mediante la carretera Fernando Belaunde Terry con aproximadamente 130 kilómetros de distancia con una duración de viaje de 120 minutos. La temperatura varía entre 20 a 33 °C. La provincia de Mariscal Cáceres colinda por el norte con la provincia de Huallaga, al este con la provincia de Bellavista, por el sur la provincia de Tocache y por el oeste con el departamento de La Libertad.

En la provincia de El Dorado, específicamente se consideraron parcelas en los alrededores del distrito de San Martín de Alao, sector alto Roque. El acceso desde Tarapoto es por vía asfaltada con aproximadamente 75 kilómetros de distancia con una duración de viaje de 120 minutos. La temperatura varía entre 20 a 32 °C. La provincia colinda por el norte con Moyobamba; al este está Lamas y Picota; por el sur la provincia de Bellavista y; por el oeste Mariscal Cáceres.

En la provincia de Lamas se consideraron parcelas próximo al distrito de Pinto Recodo, sector Mishquiyacu, por la carretera Fernando Belaunde Terry con aproximadamente 45 kilómetros de distancia con una duración de viaje de 35 minutos. La temperatura varía entre 19 a 32 °C. La provincia colinda por el norte con el departamento de Loreto, por el este la provincia de San Martín, por el sur la provincia de Picota, y por el oeste la provincia de El Dorado y Moyobamba.

En la provincia de Rioja se consideraron muestras de cacao próximo al distrito de Pardo Miguel Naranjos, sector Oriente Nuevo, cuya accesibilidad es mediante la carretera Fernando Belaunde Terry con aproximadamente 290 kilómetros de distancia con una duración de viaje de 320 minutos. La temperatura varía entre 18 a 35 °C. Rioja limita por el norte con el río Mayo; por el sur y este, el río Tónchima en Moyobamba y por el oeste, los límites del Departamento de Amazonas con el de San Martín.

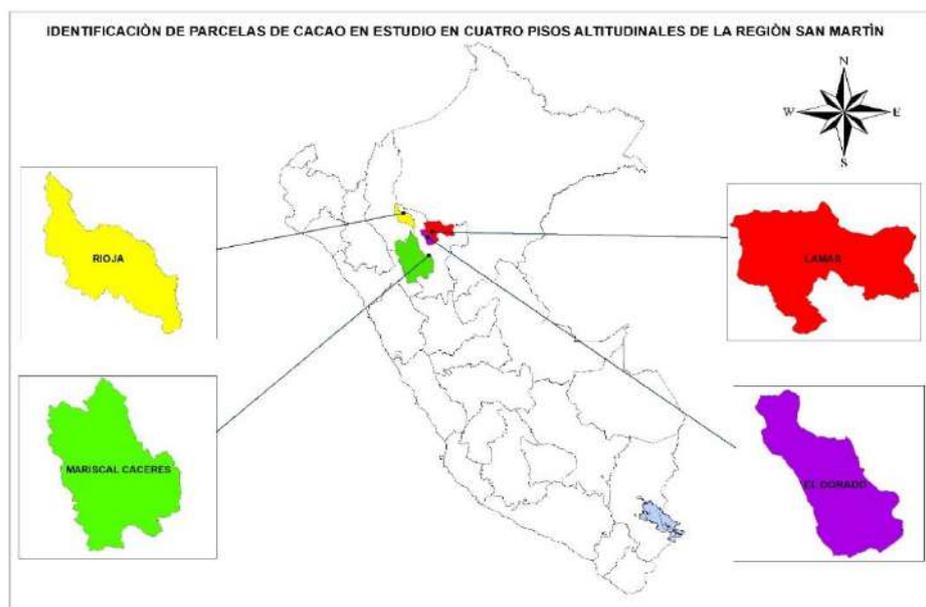


Figura 1. Ubicación de las parcelas muestreadas. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Población y muestra

2.3.1. Población

La población estuvo constituida en base a cuatro parcelas establecidas en los cuatro niveles altitudinales. Se consideraron 276 plantas de cacao, en un área de 2500 m²; distribuidas en un promedio de 69 plantas por cada parcela de 625 m² en estudio, tomando como referencia la metodología de los autores Roa-Romero *et al.*, (2009) siendo adaptada a la presente investigación.

2.3.2. Muestra

La muestra para los análisis de cadmio en raíces y granos estuvo conformada por cuatro muestras de raíces, cuatro muestras para granos, cuatro muestras para colonización y cuatro muestras para micelio, siendo en total 12 muestras para cada parcela tanto en raíces, granos, colonización y micelio respectivamente, no obstante, se extrajo, cuatro muestras de suelo para los análisis de caracterización físico-química, distribuidas al azar en forma de zigzag dentro de cada plantación; metodología similar a lo empleado por Arévalo-Gardini *et al.* (2016), en total siendo analizadas un total de 52 muestras a nivel de las cuatro parcelas, distribuidas en análisis distintos.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se desarrolló de acuerdo a las características de la investigación, para ello se utilizó un formato elaborado en Excel con la distribución de muestras donde se vaciaron los datos de análisis de cadmio en raíces y granos de plantaciones de cacao como monocultivo obtenido después de los análisis enviados al laboratorio (ver Apéndice 10). Para la validación del formato se emplearon metodologías propuestas en artículos científicos publicadas en revistas indexadas.

2.5. Descripción de la investigación

2.5.1. Identificación de fincas de cacao

Se identificaron fincas de cacao, basado en los clones de cacao CCN-51 e ICS-39 con edades uniformes como lo indica los investigadores, Engbersen *et al.* (2012) y con sistema de siembra como monocultivo; para ello se realizó un recorrido por diferentes zonas haciendo consultas respectivas a especialistas y productores de cacao. Ubicándose así las parcelas con las características deseables en cuanto a las altitudes sobre el nivel del mar en cuatro provincias de la región San Martín (Tabla 1).

Identificadas las parcelas de cacao con los dos clones (CCN-51 e ICS-39) y con edades de 12 años en monocultivo (Figura 2) se procedió a georreferenciar cada sector; estableciéndose así en cuatro pisos altitudinales (329, 532, 702 y 905 m s.n.m.); la guía adaptada a la investigación fue de los investigadores (Yang *et al.*, 2016), dentro de las provincias de Mariscal Cáceres, El Dorado, Lamas y Rioja.

Tabla 1

Ubicación y caracterización de las parcelas de cacao

Provincias	Distrito	Clon	Coordenadas		Altitud (m s.n.m.)	Edad (años)
			X (18L)	Y(UTM)		
Mariscal Cáceres	Juanjui	ICS- 39	311368	9210306	329	10
El Dorado	San Martín de Alao	CCN- 51	307022	9277298	532	9
Lamas	Pinto Recodo	ICS- 39	321799	9297823	702	9
Rioja	Pardo M. Naranjos	CCN- 51	224310	9366791	905	8

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Identificación de parcelas para el estudio de cacao. *Fuente:* Elaboración propia.

2.5.2. Selección de las plantas de cacao para el estudio

Se seleccionaron plantas de cacao con características genéticas en clones tanto CCN-51 e ICS-39 teniendo en cuenta la uniformidad en características morfológicas de la planta y su productividad; al mismo tiempo, se seleccionaron plantas de cacao libre de enfermedades; tomando como guía la metodología seguida por los autores Sánchez-Mora *et al.* (2015).

2.5.3. Etiquetado y distribución de las subparcelas de cacao

Se consideraron tres subparcelas para cada parcela, cada subparcela estaba conformado por tres plantas de cacao de las cuales se obtuvieron las muestras. Este procedimiento siguió su cauce de acuerdo a lo propuesto por Quiñones *et al.* (2018). Asimismo, se realizó el marcado y etiquetado de plantas de cacao, de muestras de suelo y frutos de ambos clones (Figura 3).



Figura 3. Etiquetado y diseño de las subparcelas de cacao. *Fuente:* Elaboración propia.

2.5.4. Colecta de muestras de raíces y granos de cacao para análisis de cadmio

Se colectaron 1 kg del sistema radicular y 1,5 kg de granos de cacao en baba a partir de frutos maduros de la parte media del árbol sano y reproductivo, según la metodología indicada de Sandoval-Pineda *et al.* (2020) para los análisis de cadmio, lo cual fue adecuado a la presente investigación. En cada provincia se tomaron 3 muestras, haciendo un total de 12 muestras de colectadas tanto de suelo como de granos de cacao (Figura 4). Dichas muestras se

enviaron al laboratorio del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) para los análisis respectivos de cadmio (ver Apéndices del 1 al 8).



Figura 4. Colecta de muestras para Cd. Nota: (A), Colecta de raíces para análisis de Cd y (B), Colecta de granos de cacao para análisis de Cd. Fuente: Elaboración propia.

2.5.5. Colecta de muestras de suelo rizosférico para la micorrización

Se colectaron 500 g de suelo rizosférico para el estudio de la micorrización y micelio extraradical (Figura 5-A) de cada planta de cacao por debajo del suelo a 15 cm y aproximadamente a 30 cm de distancia del tallo principal de cada planta. En cada provincia se consideró 3 muestras y cada una estuvo conformada de seis submuestras que fueron mezcladas y homogenizadas, según la metodología referencial de (Vallejos-Torres *et al.*, 2021). En total se colectaron cuatro muestras de suelo rizosférico de 500 g cada una para los análisis de colonización micorrícica para cada parcela, siendo en total 12 colectas de suelo rizosférico, siguiendo la metodología empleada por Vallejos-Torres *et al.* (2019), lo cual fue una guía y adecuado a nuestro estudio, 12 muestras de suelo adicional de 500 g para la medición de la longitud de micelio extraradical, siendo para cada provincia cuatro análisis. Estas muestras fueron etiquetadas de acuerdo a la procedencia y número de planta (Figura 5-B); y llevadas al laboratorio para los análisis respectivos (ver Apéndice 11).



Figura 5. Colecta de muestras. Nota: (A), Suelo rizosférico para el estudio de la micorrización y micelio extraradical rizosférico y (B), Etiquetado de muestras de suelo para laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

2.5.6. Colecta de muestras de suelo para caracterización física-química

Para realizar la colecta de muestras de las parcelas identificadas se recurrió a la técnica de muestra compuesta, de ese modo se siguió una metodología de la Guía técnica para el muestreo de suelos formulado por el Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014, p.1-72).

- Se esterilizó la pala para luego ser señalada a una altura de 20 cm, de ese modo tener una base de la profundidad que se va trabajar.
- Se realizó un hoyo en forma de “V”, y luego se tuvo que eliminar una ligera capa de 2cm a 3 cm de espesor, que fue seccionado tanto en la parte lateral y parte superior con ello se descarte las impurezas que pueden contaminar a la muestra.
- El suelo colectado para caracterización de plantaciones de cacao fue depositado en material de plástico (bolsas) que fueron debidamente rotuladas (Figura 6).
- Posterior a ello las muestras fueron trasladadas al laboratorio para poder homogenizar de acuerdo al rótulo luego ser secadas y finalmente ser pesadas, rotuladas y poder ser evaluadas en el laboratorio.

Se obtuvo tres muestras representativas por cada parcela que fueron secados al horno a 70 °C durante al menos 72 h. para luego enviarlas al laboratorio del ICT a razón de 500 g de suelo seco para los análisis respectivos de caracterización física y química; previamente

etiquetadas con el código respectivo de cada procedencia y acompañada de una tabla de leyenda de cada muestra (ver Apéndice 9 y 12).



Figura 6. Colecta de suelos para caracterización (análisis de suelos) en plantaciones de cacao. *Fuente:* Elaboración propia.

2.6. Identificación de variables y su mensuración

En la Tabla 2, se presenta las características de las variables, los indicadores, metodología y unidad de medida evaluados en plantaciones de cacao como monocultivo en la región San Martín.

Tabla 2

Variables evaluadas en plantaciones de cacao como monocultivo

Variab les	Indicador	Descripción metodológica	Unidad de medida
Variable independiente	I ₁ : Porcentaje de colonización y micelio.	Metodología de Brundrett <i>et al.</i> (1996).	Porcentaje (%)

X1: Hongos Micorrícicos Arbusculares	I2: Caracterización física-química de suelos		pH (rangos) potenciómetro suspensión suelo-agua relación 1:2:5; fósforo (P) Olsen modificado Extract, NaHCO ₃ ; Nitrógeno total espectrofotometría; Conductividad eléctrica (CE) Conductímetro suspensión suelo-agua relación 1:2:5 y Materia orgánica (MO) Walkley y Black.	P (ppm), N total (%), CE (dS/m) y MO (%)
Variable dependiente	I1: Cadmio en raíces cacao	en	El cadmio en suelos se determinó por el método de EPA 3050B.	Ppm
X1: Presencia de cadmio (Cd)	I2: Cadmio en granos de cacao	en	El cadmio en granos se determinó por el método de Digestión HNO ₃ :H ₂ O ₂	Ppm

2.6.1. Análisis de muestras de suelo para la micorrización

a. Cuantificación de la micorrización

De los 500 g de suelo rizosférico colectadas, se seleccionaron raíces secundarias y terciarias para los análisis de colonización, estas se transfirieron a tubos de ensayo con alcohol etílico al 70 % previamente lavadas con agua destilada. Los tubos conteniendo las raíces se depositaron en un refrigerador a 4 °C. Estas raíces, posteriormente fueron teñidas mediante la técnica de Phillips y Hayman (1970). Las raicillas de depositaron en envases de vidrios de borosilicato de 16 x 150 mm con contenidos de hidróxido de potasio (KOH) al 10 %, durante 24 h. Después de eso, las raíces se depositaron en un baño maría a 90 °C durante 30 min. Luego, se lavaron tres veces con agua del grifo y se sumergieron en agua oxigenada (H₂O₂) por 90 min a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras de raíz se lavaron tres veces con vinagre blanco, se sumergieron en solución de tinta parker al 0,25 %, para luego volver a depositarlos en un baño maría a 90 °C durante 60 min y se lavaron tres veces con la finalidad de eliminar la excesiva solución de tinta. Finalmente, las raíces teñidas se conservaron en vinagre blanco. Para la evaluación de la colonización por HMA, se colocaron

verticalmente en portaobjetos de microscopio 30 segmentos de raíces teñidas de 1 cm de longitud para facilitar la observación de los tejidos internos, luego se aplicó una gota de lactoglicerol a cada 10 raíces y luego se colocarán cubreobjetos sobre ellas.

El proceso de evaluación de la colonización micorrícica se realizó mediante la metodología propuesta por Brundrett *et al.*, (1996), donde 30 segmentos de las raíces teñidas de 1 cm de longitud fueron colocados verticalmente en portaobjetos y divididos en 3 zonas de observación (superior, intermedio e inferior) en un microscópico binocular a 10 X. Cada zona se observó minuciosamente y se marcó en un cuadernillo la presencia y ausencia de estructuras micorrícicas (vesículas, arbuscúlos e hifas), proceso que se hizo con los 30 segmentos montados en la lámina portaobjeto (Figura 7).

Para el cálculo de la colonización micorrícica de HMA en las raicillas se desarrolló a través de la siguiente fórmula matemática:

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

Donde:

% CM= Porcentaje de colonización micorrícica

N= Número total de segmentos evaluados

n= número total de zonas con presencia de estructuras micorrícicas



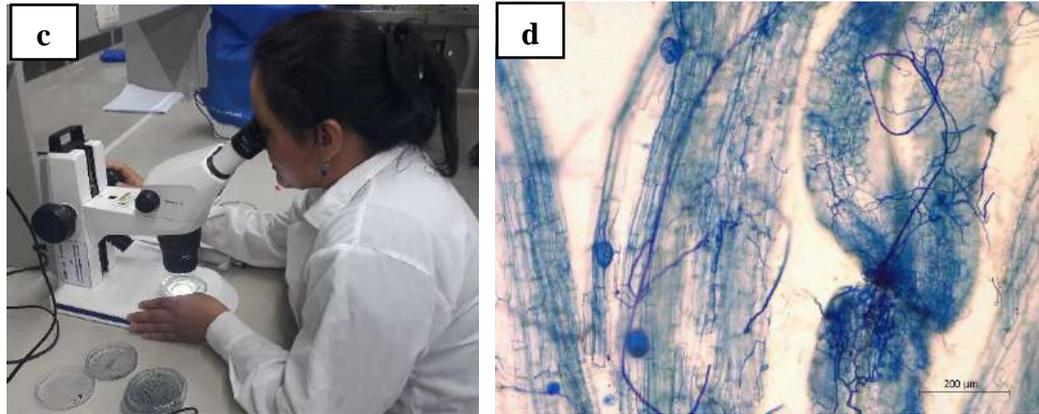


Figura 7. Preparación de material biológico y evaluación de la colonización micorrízica. Nota: (a y b) Tinción de raíces de cacao; (c) Preparación de raíces en el microscopio binocular; (d). Presencia de la colonización micorrízica. Fuente: Elaboración propia.

b. Determinación de la longitud de micelio extraradical (MER)

Para determinar la longitud del micelio extraradical se utilizó la técnica de cuantificación y gel semisólido mediante el método de las intersecciones del cuadrante, propuesto por Robles, (2009). Para ello se tomaron las muestras de raíces extraídas del campo, luego fueron lavadas con abundante agua y finalmente teñidas. Estas raíces teñidas fueron llevadas a un microscopio estereoscópico de 5X (Figura 8) donde se realizó el conteo de las intersecciones hifa-línea en 10 ml de solución con la fórmula de Tennant, (1975).

Metodología para la determinación del micelio extraradical mediante la fórmula:

$$LM = 11/14 * \text{número de intersecciones} * \text{unidad de medida}$$

Dónde: LM: Longitud de Micelio extraradical

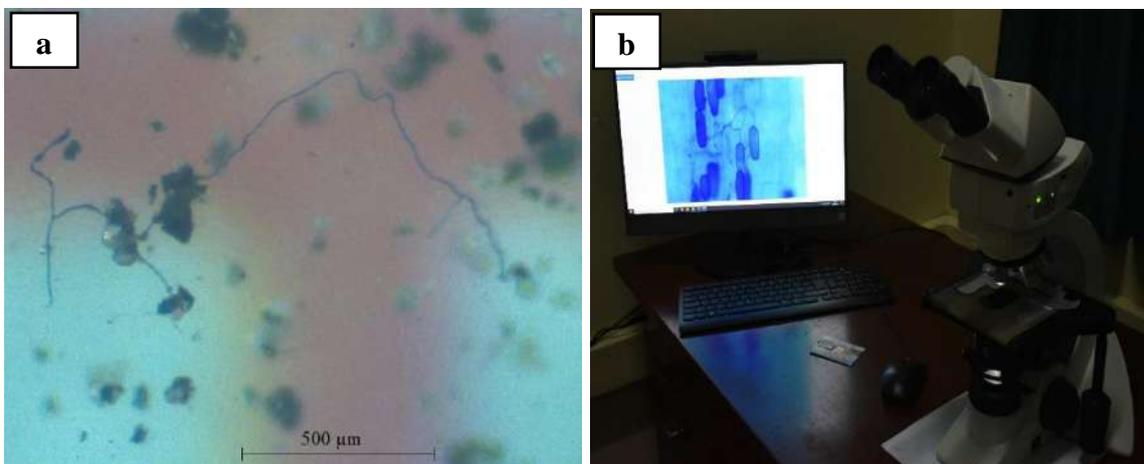


Figura 8. Preparación de material biológico y evaluación de la longitud de micelio.

Nota: (a y b) Uso de microscopio binocular, laptop y programa micorrízica para la evaluación de la longitud de micelio. *Fuente:* Elaboración propia.

2.6.2. Análisis de muestras de raíces y granos de cacao para cadmio

Las raíces y granos de cacao colectadas (Figura 9) se secaron al horno a 70 °C durante 72 h, luego fueron enviados al laboratorio del ICT a razón de 500 g de cada uno por muestra para los análisis respectivos de cadmio; previamente etiquetadas con el código respectivo de cada procedencia y acompañada de una tabla de leyenda de cada muestra.



Figura 9. Muestreo del sistema radicular en plantaciones de cacao. *Fuente:* Elaboración propia.

a. Determinación del cadmio en raíces

La colecta de raíces consistió tomar raíces secundarias y terciarias de plantaciones de cacao enmarcadas en las parcelas en estudio, siguiendo la metodología de Vallejos-Torres *et al.* (2022), y adaptada al estudio de investigación, se obtuvo 12 muestras representativas, es decir, tres muestras por cada parcela, las que fueron codificadas y enviadas al laboratorio del ICT-Tarapoto, para el descarte de presencia de cadmio. El cadmio en raíces se determinó por el método de Digestión HNO₃/Espectrometría de absorción atómica (ver Apéndice 1, 2, 3, 4 y 10).

b. Determinación del cadmio en granos

El muestreo de granos se realizó según la metodología de Mite *et al.* (2010), para el cual se colectaron 12 frutos de cacao por subparcela, las cuales fueron mezclados para obtener una sola muestra homogénea y representativa por tratamiento. Seguidamente se realizó los siguientes pasos:

- Se colectaron 12 frutos de cacao por cada submuestra a razón de cuatro frutos por planta. Siendo en promedio 72 frutos colectados a nivel de parcela, teniendo en cuenta que se tenía seis subparcelas y cada subparcela estaba conformado por tres plantas, posterior a ello, se abrieron y se extrajeron los granos de cacao que a su vez fueron mezcladas para obtener una sola muestra representativa y homogénea por tratamiento, se obtuvo 3 muestras para cada parcela.
- Luego se depositó en bolsas plásticas transparentes con la finalidad de evitar el contacto con otros metales pesados. A cada bolsa conteniendo los granos de cacao se realizaron orificios para luego dejar transcurrir tres días para poder obtener fermento. se dejó fermentar por tres días.
- Posteriormente se colocó bajo sombra para poder ser secadas cuyo ambiente fue cerrado para evitar todo tipo de contaminación, luego de ser secadas se colocó en empaques de papel debidamente rotuladas para ser entregadas al laboratorio del ICT para el concerniente análisis de cadmio. El cadmio en almendras de *T. cacao* se determinó por el método de Digestión $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ (2:1)/ Espectrofotometría de absorción atómica.

c. Determinación de las propiedades física químicas de suelos

El muestreo de suelos se realizó siguiendo los pasos de acuerdo a la Guía técnica propuesto por el Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014). Las siguientes propiedades físico-químicas fueron determinadas: pH (1:2 H_2O ; método del potenciómetro), conductividad eléctrica (conductímetro), la arcilla por análisis mecánico, iones disponibles (P, K; método de Olsen modificado), y materia orgánica del suelo (MOS) por el método de Walkley y Black

(espectrofotómetro de absorción atómica) y los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) por absorción atómica. Extract. $\text{KCl} = 0.1\text{N}$ ó $(\text{NHA}) \text{CH}_3\text{-COOH} = 1\text{N}$.

2.7. Análisis estadístico de datos

Se realizó la correlación de variables entre cadmio en suelo y granos con la caracterización de los suelos de las cuatro zonas altitudinales. Las diferencias entre los valores cuantitativos (grado de colonización, contenido de cadmio y propiedades físico-químicos del suelo) se determinaron mediante la prueba de rango múltiple de Tukey, con una probabilidad de error del 5 %. Todos los análisis fueron realizados empleando el lenguaje de programación R versión 4.0.2 using *R Statistical Software* (R Core Team. 2020). Se estimó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables cadmio en raíz y granos, porcentaje de colonización y longitud de micelio; en aquellos escenarios donde la correlación fue alta o media se ajustó al modelo de regresión lineal.

2.8. Materiales y equipos

Campo y vivero

- Botas de jebe
- Cámara fotográfica
- Machete y palana
- Rafia y costales
- Bolsas de polietileno
- GPS
- Lapicero Indeleble
- Tabla de apuntes y etiquetas de plástico
- Libreta de campo
- Etiquetas blancas

Laboratorio

- Tinta Parker
- Tamiz de 38 micras y 250 micras
- Placas Petri
- Centrifuga de 5000 Rev. y tubos falcón
- Pipetas y micropipetas
- Centrómetros manuales
- Tubos de ensayo
- Baño María
- Microscopio óptico y estéreo
microscopio

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Correlación y contenido de cadmio en el sistema radicular, granos de cacao y caracterización de suelos

3.1.1. Contenido de cadmio en el sistema radicular y caracterización de suelos

A continuación, se presenta la correlación de Pearson (Tabla 3) y Prueba de Tukey para el contenido de cadmio en raíces (Figura 10).

Tabla 3

Correlación de Pearson entre el contenido de cadmio en raíces y las principales características de los suelos

	pH	Arcilla (%)	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)	Ca²⁺ (cmol. kg⁻¹)	Mg²⁺ (cmol. kg⁻¹)	K⁺ (cmol. kg⁻¹)
Cadmio en Raíz (mg.kg⁻¹)	0,61	-0,38	-0,24	-0,18	0,28	0,53	0,02	0,28

Fuente: Elaboración propia.

Los niveles de la correlación de Pearson para el contenido de cadmio en el sistema radicular y las características físico-químico de los suelos de cacao de 329, 532, 702 y 905 msnm, se presentan en la Tabla 3. El contenido de cadmio presentó una correlación positiva y significativa ($p < 0,05$) con el pH ($r = 0,61$), y correlación positiva no significativa ($p < 0,05$) con el K, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ ($r = 0,28$; 0,53; 0,02 y 0,28, respectivamente). Mientras que la arcilla, MO y P muestra una correlación negativa no significativa ($r = -0,38$; -0,24 y -0,18, respectivamente).

La concentración de Cd en los sistemas radiculares de las plantaciones de cacao como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 329 y 532 m s.n.m. fueron significativamente más altos con valores de 1,87 y 1,34 mg.kg⁻¹, respectivamente; en comparación con las plantaciones como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 702 y 905 m s.n.m. con valores de 0,69 y 1,00 mg.kg⁻¹, respectivamente (Figura 10).

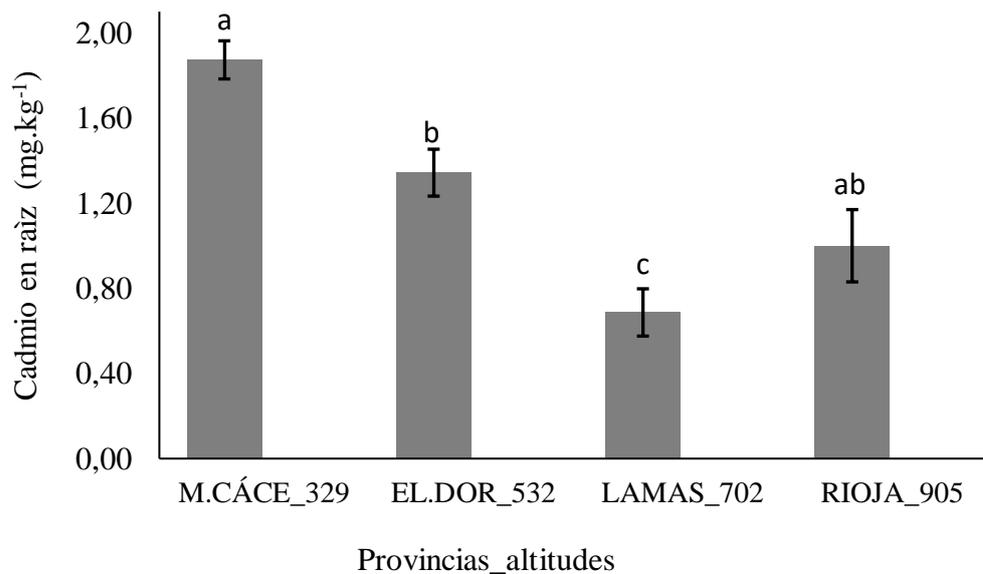


Figura 10. Contenido de cadmio en raíz en los cuatro sistemas de producción de cacao.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Contenido de cadmio en granos de cacao y caracterización de suelos

A continuación, se presenta la correlación de Pearson (Tabla 4) y Prueba de Tukey para el contenido de cadmio en granos (Figura 11).

Tabla 4

Correlación de Pearson entre el contenido de cadmio en granos y las principales características de los suelos

	pH	Arcilla (%)	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)	Ca ²⁺ (cmol. kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol. kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol. kg ⁻¹)
Cadmio en Granos (mg.kg⁻¹)	0,25	-0,54	0,5	0,54	0,15	0,04	-0,08	0,15

Fuente: Elaboración propia.

La correlación de Pearson entre el contenido de cadmio en granos y algunas propiedades físicas-químicas de los suelos en plantaciones de cacao como monocultivo orgánico estudiados a niveles altitudinales de 329, 532, 702 y 905 m s.n.m., se muestran en la Tabla 4. El cadmio en granos de cacao mostró una correlación positiva, no significativa ($p < 0,05$) con el pH, MO, P, K, Ca²⁺, K⁺ ($r = 0,25; 0,5; 0,54; 0,15; 0,04, y 0,15$ respectivamente). Mientras que la arcilla y Mg²⁺ mostró una correlación negativa no significativa ($r = -0,54 y -0,08$).

La concentración de cadmio en granos o almendras de cacao como monocultivo orgánico a dos niveles altitudinales de 532 y 905 m s.n.m., fueron significativamente más altos con valores de 1,80 y 1,65 mg.kg⁻¹ respectivamente a comparación de las plantaciones establecidas a 329 y 702 m s.n.m. que mostraron valores de 0,55 y 0,35 mg.kg⁻¹, respectivamente (Figura 11).

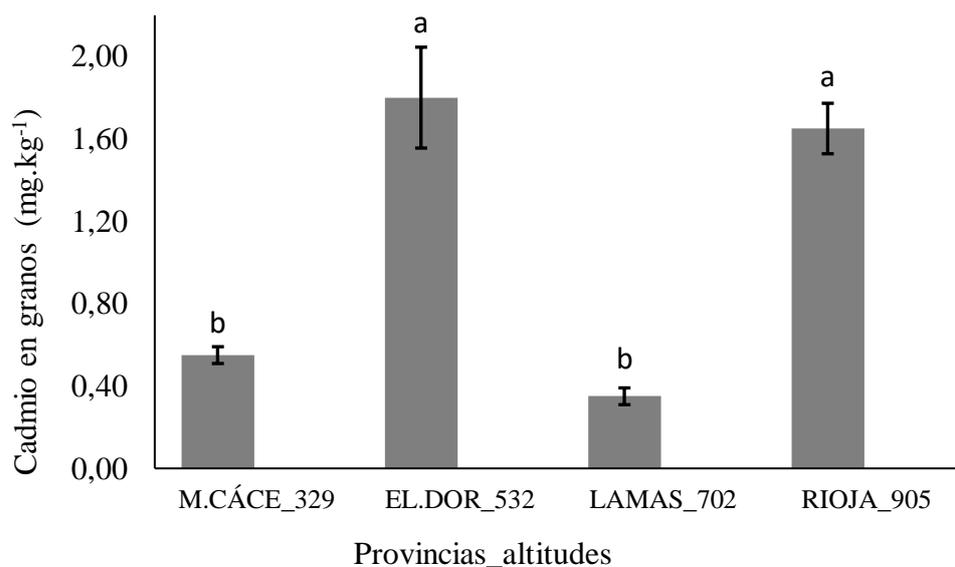


Figura 11. Contenido de cadmio en granos en los cuatro sistemas de producción de cacao. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Micorrización y caracterización de suelos

3.2.1. Colonización micorrízica y caracterización de suelos en plantaciones de cacao

A continuación, se presenta la correlación de Pearson (Tabla 5) y Prueba de Tukey para la colonización micorrízica (Figura 12).

Tabla 5

Correlación de Pearson entre la colonización micorrízica y las principales características de los suelos de plantaciones de cacao estudiados

	pH	Arcilla (%)	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)	Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)
Colonización (%)	-0,61	0,37	0,15	0,23	-0,44	-0,54	0,1	-0,44

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la correlación de Pearson entre la micorrización y la caracterización físico-química de los suelos en las cuatro parcelas se muestran en la Tabla 5. La colonización presentó una correlación positiva ($p < 0,05$) con la arcilla, MO, P y Mg²⁺ ($r = 0,37; 0,15; 0,23$

y 0,1 respectivamente). Mientras que el pH presentó correlación negativa significativa ($r = -0,61$). Asimismo, el K, Ca^{2+} y K^+ mostró una correlación negativa no significativa ($r = -0,44$; $0,54$ y $0,44$ respectivamente).

La colonización micorrízica en el suelo rizosférico de plantaciones de cacao como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 702 y 905 m s.n.m. fueron significativamente más altos con valores de 71,32 y 71,44 %, respectivamente a comparación de las plantaciones como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 329 y 532 m s.n.m. con valores de 58,65 y 62,78 % respectivamente (Figura 12).

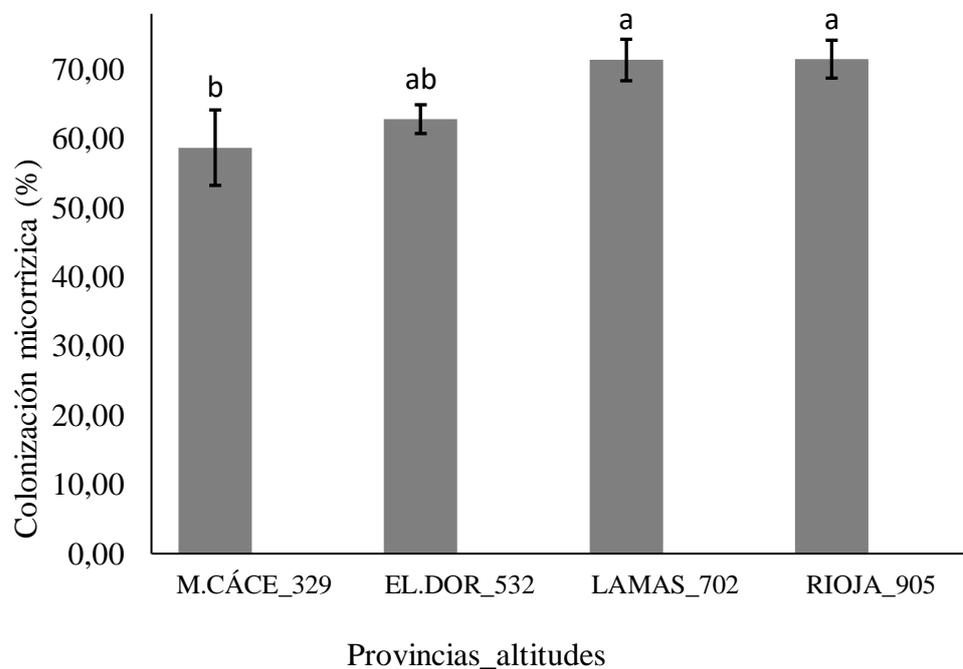


Figura 12. Colonización micorrízica en los cuatro sistemas de producción de cacao. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Longitud de micelio y caracterización de suelos en plantaciones de cacao

A continuación, se presenta la correlación de Pearson (Tabla 6) y Prueba de Tukey para la longitud de micelio extrarradical (Figura 13).

Tabla 6

Correlación de Pearson entre la longitud de micelio y las principales características de los suelos de plantaciones de cacao estudiados

	pH	Arcilla (%)	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)	Ca ²⁺ (cmol. kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol. kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol. kg ⁻¹)
Longitud de micelio (cm)	-0,53	-0,1	-0,1	0,35	-0,51	-0,47	0,28	-0,51

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos por la correlación de Pearson entre la longitud de micelio extrarradicular con el P y Mg²⁺ muestran una correlación positiva no significativa ($r = 0,35$ y $0,28$) y una correlación negativa no significativa con el pH, arcilla, MO, K, Ca²⁺ y K⁺ ($r = -0,53$; $-0,1$; $-0,1$; $-0,51$; $-0,47$ y $-0,51$ respectivamente).

La longitud de micelio extrarradicular, evaluada en el suelo rizosférico de plantaciones de cacao como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 702 y 905 m.s.n.m., fueron significativamente más altos con valores de 14,58 y 14,77 cm respectivamente a comparación de las plantaciones como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 329 y 532 msnm con valores de 13,18 y 12,67 cm respectivamente (Figura 13).

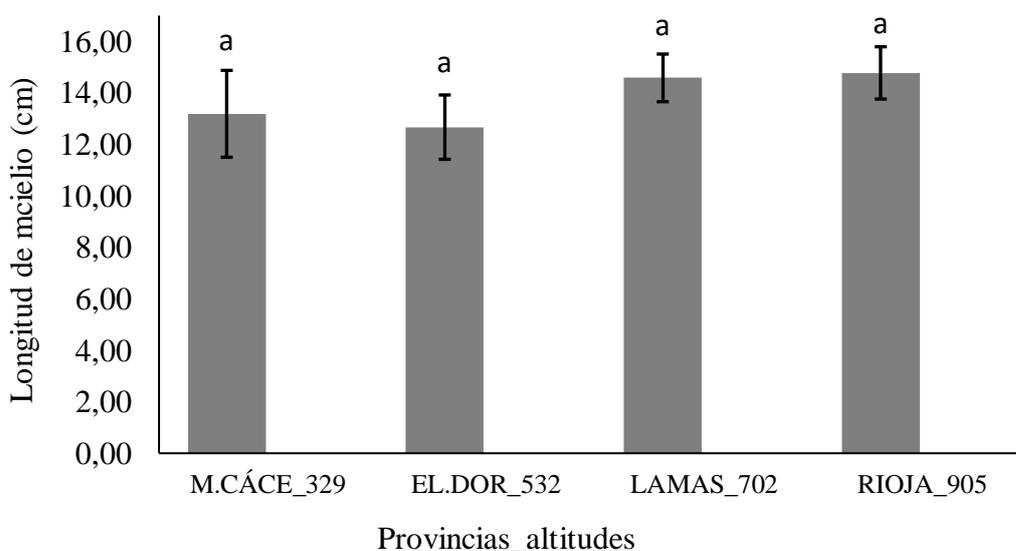


Figura 13. Longitud de micelio extrarradical en los cuatro sistemas de producción de cacao. *Fuente:* Elaboración propia.

3.3. Correlación de la micorrización y contenidos de cadmio

3.3.1. Correlación de la colonización micorrízica y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao establecido como monocultivo

A continuación, se presenta la correlación de Pearson (Tabla 7) y Correlación micorrízica en relación al contenido de cadmio en raíces y granos de cacao (Figura 14).

Tabla 7

Correlación de Pearson entre la colonización micorrízica y contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao estudiados

Variables		Coefficiente de correlación de Pearson	Nivel de correlación	Tipo de correlación
Colonización micorrízica	Cadmio en raíz	-0,7689808	Alta	Negativa
	Cadmio en granos	0,07937452	Muy Baja	Positiva

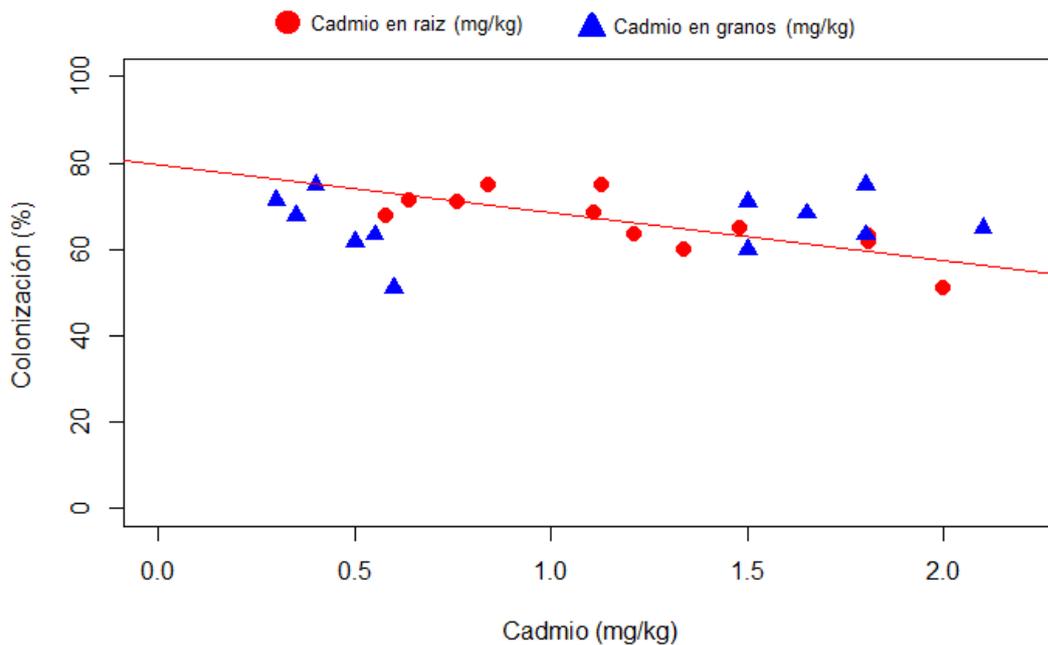


Figura 14. Correlación de la colonización micorrízica en relación al contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14, se observa que hay una correlación negativa alta entre las variables de cadmio en raíz y colonización, la cual es descrita por la ecuación: $Y=79,601-11,056X$ ($R^2=0,59$); esto implica que a medida que disminuye la colonización micorrízica, aumente el contenido de cadmio en la raíz con una correlación de $-0,768$. Por otra parte, se puede evidenciar que no existe correlación entre las variables cadmio en granos y colonización donde se obtuvo un $0,079$ (Tabla 7).

3.3.2. Correlación de la longitud de micelio y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao establecido como monocultivo

A continuación, se presenta la correlación de Pearson (Tabla 8) y correlación del micelio en relación al contenido de cadmio en raíces y granos de cacao (Figura 15).

Tabla 8

Correlación de Pearson entre la longitud de micelio y contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao estudiados

Variables	Coficiente de correlación de Pearson	Nivel de correlación	Tipo de correlación	
Longitud de micelio	Cadmio en raíz	-0,4083611	Media	Negativa
	Cadmio en granos	-0,1936561	Muy Baja	Negativa

Fuente: Elaboración propia.

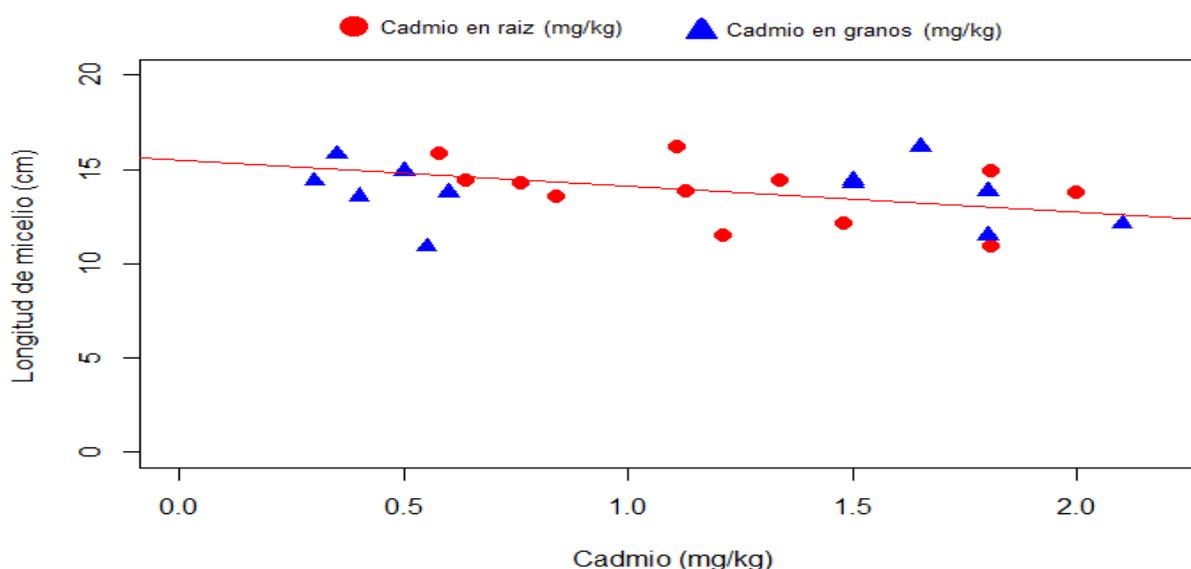


Figura 15. Correlación de la longitud del micelio en relación al contenido de cadmio en raíces y granos de cacao en suelos de plantaciones de cacao. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se puede observar la existencia de una correlación negativa media entre las variables cadmio en raíz y longitud de micelio, la cual es descrita por la ecuación: $Y=15,4896-1,3777X$ ($R^2=0,17$); esto implica que a medida que disminuye la longitud de micelio aumenta el contenido de cadmio en la raíz con una correlación de $-0,408$. Por otra parte, se puede evidenciar que no existe correlación entre las variables cadmio en granos y longitud de micelio donde se obtuvo un $-0,193$ (Tabla 7).

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Correlación y contenido de cadmio en el sistema radicular, granos de cacao y caracterización de suelos

4.1.1. Contenido de cadmio en el sistema radicular y caracterización de suelos

El pH es una de las propiedades del suelo que expresan si el cadmio está disponible o móvil en el suelo y el sistema radicular de una planta (Alloway, 2013); como se observa existe una correlación positiva y significativa ($p < 0,05$) con el potencial de hidrógeno (pH) ($r = 0,61$) (Tabla 3). Esto se debe probablemente a que en los sitios donde el Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ son absorbidos, están relacionados con la entrada de cadmio hacia el sistema radicular de la planta por la capacidad de intercambio catiónico tal como lo demuestra Kabata-Pendias, (2010). Asimismo, el cadmio tuvo una correlación negativa y significativa con el porcentaje de arcilla y MO del suelo ($r = -0,38$ y $-0,24$). Sin embargo, la existencia de materia orgánica (MO) y el porcentaje de arcilla pueden causar efectos significativos en la disponibilidad del cadmio; esto se debe a que una mejor calidad de MO redundaría en menor movilidad y toxicidad por bioacumulación; es decir la aplicación de materia orgánica a un suelo contaminado puede reducir la capacidad de extracción y la biodisponibilidad de Cd como lo indica Houben *et al.*, (2012) al estudiar la inmovilización de metales pesados mediante enmiendas rentables en un suelo contaminado. Se encontró una correlación positiva pero no significativa del cadmio con el Mg^{2+} ($r = 0,02$). De igual modo, existe una correlación positiva del Cd con el Ca^{2+} , K^+ ($r = 0,53$ y $0,28$ respectivamente). Sauve *et al.* (2000), indican que las propiedades químicas del suelo como la CIC, MO, porcentaje de arcilla y pH están en función con los metales pesados. Asimismo, Alloway, (2013) menciona que el porcentaje de arcilla, materia orgánica y óxidos son factores importantísimos en la adsorción de metales pesados (MP). En la agricultura, la principal fuente de este metal es la aplicación de fertilizantes que contienen fosfatos, estos hacen que el Cd se acumule en suelos agrícolas y por lo tanto aumenta el riesgo de su transferencia a través de la cadena alimentaria (Salmanzadeh *et al.*, 2017). El pH y Cd del suelo en el lugar donde se encuentran los árboles

de cacao cultivados son factores importantes que determinan la disponibilidad de Cd en las plantas (Chavez *et al.*, 2015).

La prueba de Tukey para el contenido de cadmio en el sistema radicular (Figura 10), muestra que hubo diferencia significativa, siendo las muestras procedentes de parcelas de cacao como monocultivo del sector Juanjuicillo ubicado en el distrito de Juanjuí provincia de Mariscal Cáceres colectado a 329 m s.n.m. y del sector Alto Roque del distrito de San Martín de Alao provincia de El Dorado que mostró el mayor contenido de cadmio con 1,87 a 1,34 mg.kg⁻¹ y el menor valor lo obtuvo las parcelas de cacao como monocultivo procedente del sector Mishquiyacu distrito de Pinto Recodo provincia de Lamas a 702 m s.n.m y del sector Oriente Nuevo ubicado en el Distrito de Pardo Miguel Naranjos provincia de Rioja a 905 m s.n.m, con valores de 0,69 a 1,00 mg.kg⁻¹, respectivamente. Altos valores de cadmio también se presentaron en la provincia de Bagua, región Amazonas (Oliva *et al.*, 2020). Es sabido que el cadmio es móvil en los suelos y en la asimilación por las plantas perennes como el cacao; influyendo muchos factores como la textura del suelo, pH, CIC y contenido de materia orgánica; esto se ve reflejado en cada una de los niveles altitudinales que se muestrearon en los sectores de Juanjuicillo, Alto Roque, Mishquiyacu y Oriente Nuevo ubicado en las provincias de Mariscal Cáceres, El Dorado, Lamas y Rioja respectivamente. Asimismo, otro de los factores relevantes pudo haber sido la presencia de malezas en los campos de cacao en parcelas bajo sistemas de monocultivo; ya que es sabido que la concentración de metales pesados aumenta constantemente en la biomasa de malezas con el aumento de la contaminación del suelo tal como lo indica Hossein *et al.* (2016), al estudiar la capacidad de las malezas para fitorremediar suelos contaminados con cadmio. Los elevados niveles de Cd encontradas en las parcelas de M. CÁCE_329 y EL. DOR_532 con 1,87 y 1,34 mg.kg⁻¹ respectivamente, concuerda con la alta acumulación de Cd reportadas por Mendoza-López *et al.* (2021) para la provincia de Lamas en la región San Martín. Asimismo, se debe a que los árboles de cacao extraen más Cd del suelo que las plantas en general (Zarcinas *et al.*, 2004). Otras de las razones podrían deberse a que los agricultores de la zona hayan aplicado fertilizantes o pesticidas, ya que elevadas concentraciones de cadmio en los suelos y raíces superiores de las plantaciones de cacao también resultan de la aplicación de fertilizantes o pesticidas (Chavez *et al.*, 2015).

También, los clones de cacao tienen efecto sobre la concentración de cadmio; hay que entender que en este estudio se trabajó con clones CCN-51 e ICS-39; tal es así que, en Ecuador, Barraza *et al.* (2017) encontraron valores promedio de $1,21 \pm 0,87$ y $0,89 \pm 0,64$ mg.kg^{-1} para el genotipo CCN51 y otras variedades nacionales ecuatorianas. En la región de San Martín, Perú, Chupillón (2017) encontró que el cadmio para el clon de cacao CCN-51 estuvo entre 11,89 y 3,31 mg.kg^{-1} .

4.1.2. Contenido de cadmio en granos de cacao y caracterización de suelos

El cadmio se encuentra disponible y a la vez móvil en el suelo cuya propiedad química para su control es el pH (Christensen, 1984; Alloway, 2013); como se observa en el estudio existe una correlación positiva no significativa ($p < 0,05$) para el contenido de pH, MO, P, K entre otras características ($r = 0,25$; $0,5$; $0,54$ y $0,15$ respectivamente). Sin embargo, el Cd tuvo una correlación negativa no significativa con el contenido de arcilla y Mg^{2+} ($r = -0,54$ y $-0,08$ respectivamente) (Tabla 4). Las concentraciones de Cd en los tejidos del cacao pueden ser mayores debido a procesos de acumulación (Fauziah *et al.*, 2001). Además, encontramos diferencias en la concentración de Cd en semillas de cacao en diferentes provincias muestreadas, presumiblemente basado también a las prácticas de manejo del cacao.

La prueba de Tukey para el Cd en granos de *T. cacao* (Figura 11) muestra que hubo diferencias significativas entre las parcelas procedente de El Dorado a 532 m s.n.m. y Rioja a 905 m s.n.m. mostraron el mayor contenido de cadmio superior a $1,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ y el menor valor lo obtuvo las parcelas de cacao de Mariscal Cáceres y Lamas a 329 y 702 m s.n.m., con valores de $0,55$ y $0,35 \text{ mg.kg}^{-1}$ respectivamente. El alto contenido de cadmio, probablemente se deba al pH, ya que el pH ácido puede favorecer la solubilización de este catión y su transferencia por las raíces a la planta del cacao como lo indica Barraza *et al.* (2017), donde investigó el contenido de Cd en suelos y cacao cultivado en fincas ecuatorianas en áreas impactadas por actividades petroleras. Otra de las razones podría deberse a la presencia de los clones de cacao instalados en las fincas. En contraste, Arévalo-Gardini *et al.* (2017) reportaron diferencias en la absorción de Cd en fincas con diferentes clones de cacao; tal es así que una combinación de CCN-51 e

ICS-95 juntos, tenían cadmio más alto que un solo clon tal como sucedió en los clones de las provincias de El Dorado y Rioja.

Asimismo, el uso de fertilizantes que a menudo se observa en fincas de cacao incrementaron el contenido de cadmio en las parcelas de El Dorado y Rioja, hay que entender que el uso de fertilizantes en general y el uso de fertilizantes nitrogenados aumentan drásticamente el Cd en semillas de cacao ya que muchos fertilizantes, particularmente fertilizantes de fosfato, se sabe que están contaminados con Cd (Fauziah *et al.*, 2001). Por lo tanto, recomienda usar abono compost preparado en base a residuos de cosecha y estiércol de animales domésticos como las aves de corral, cerdos y vacuno; asimismo, es propicio emplear otras enmiendas orgánicas como guano de isla, humus de lombriz que favorecen la inmovilización del cadmio del suelo a la planta.

Gramlich *et al.* (2018) reportaron concentraciones de Cd en granos de cacao demasiado altas (Con un promedio de $2,6 \pm 0,4$ mg.kg⁻¹). El estudio también reporta concentraciones de Cd mucho más altas en granos de cacao que en el suelo (Ramtahal *et al.*, 2015). Atribuimos las diferencias entre los últimos estudios y nuestro estudio a las diferencias en los cultivares y condiciones del sitio.

Otra de las razones podría deberse a que muchos de los productores de cacao tienen los campos con abundante maleza, como se puede observar en la identificación de las fincas y colecta de las muestras de cacao. Reportes científicos indican que la acumulación de Cd en semillas de cacao es significativamente mayor cuando la diversidad vegetal general y la abundancia de hierbas es mayor (Arévalo-Gardini *et al.*, 2017). En consecuencia, Gramlich *et al.* (2017) también mostraron que uno de los factores de contaminación del grano de cacao depende en gran medida de la disponibilidad de este elemento en el suelo.

4.2. Micorrización y caracterización de suelos

4.2.1. Colonización y caracterización de suelos en plantaciones de cacao

Para los valores de concentración de pH, mostró correlación negativa significativa con valor de -0,61, mientras K, Ca²⁺ y K⁺ mostró correlación negativa no significativa con valores -0,44; -0,54 y -0,44 respectivamente, la Tabla 5, demuestra que existe una correlación negativa entre la colonización micorrízica y las propiedades químicas del suelo. Para los demás parámetros evaluados como arcilla, MO, P y Mg²⁺ se encontró una correlación positiva no significativa, resultados similares encontró Restrepo (2019) en suelos de zonas norte de Colombia. En su mayoría de los suelos estudiados presentaron valor ligeramente ácido especialmente los suelos de fincas de cacao establecidas en Lamas. Se conoce que el efecto del pH es directo sobre la solubilidad y disponibilidad de elementos para las raíces de las plantas, incluyendo fósforo, hierro, manganeso, cobre, zinc y aluminio; considerándose que los HMA pueden tolerar condiciones adversas de pH; asimismo, el pH fuertemente ácido tiende a favorecer el desarrollo de los hongos micorrízicos arbusculares (González *et al.*, 2007).

Asimismo, los efectos que producen los HMA en el suelo son de alguna forma variable, pero se menciona que estos hongos frente a condiciones adversas de pH presentan tolerancia porque alteran la rizosfera de la planta al momento de la absorción de nutrientes (Pérez *et al.*, 2011). La prueba Tukey para el Cd en granos (Figura 12) presentó diferencias entre las parcelas; donde las muestras procedentes de Lamas y Rioja a 702 y 905 m s.n.m. mostraron los valores más altos en colonización micorrízica por encima del 60 %. El grado de colonización total estimada se considera alto de acuerdo a la siguiente categoría: De 0 a 20 % es bajo, 20,1 a 50 % es medio y mayor del 50 % es alto (Nicolson y Schenck, 1979). La alta presencia de colonización micorrízica probablemente se deba a las condiciones de acidez de los suelos; ya que algunos reportes científicos han demostrado que la colonización puede variar con el pH del suelo (Van Aarle *et al.*, 2002; Dumbrell *et al.*, 2010), indicándose que el pH en el suelo tenía una mayor influencia en las comunidades de consorcios de hongos MA que las especies de plantas hospedadoras.

Las parcelas de cacao ubicadas en las provincias de Mariscal Cáceres y El Dorado mostraron los más bajos niveles de micorrización, esta atribución podría deberse a ciertas propiedades requeridas para el hongo que son el pH, textura, materia orgánica, CIC, salinidad, etc. y magnitudes físicas como la temperatura, presencia de ciertas épocas de

sequía. en los campos. Algunos de los productores realizan remoción de los rastrojos de cacao en las plantas de cacao; estos al descomponerse podrían agregarse cadmio en las parcelas de cacao; esto sumado a otras malas prácticas agronómicas incrementa el cadmio tanto en los suelos como en la parte vegetativa del cultivo (González, *et al.*, 2007). La efectividad de los hongos micorrízicos depende no solo de factores bióticos, sino también abióticos tales como propiedades fisicoquímicas del suelo, disponibilidad de agua y elementos biogénicos.

4.2.2. Longitud de micelio y caracterización de suelos en plantaciones de cacao

Este estudio presenta una correlación positiva no significativa entre el fósforo (P) y la longitud de micelio (Tabla 6). Para los demás parámetros evaluados como pH, arcilla, MO, K, etc, se encontró una correlación negativa no significativa, algunos hallazgos científicos manifiestan que los HMA transportan fósforo a las plantas mediante sus hifas (Ezawa *et al.*, 2002). Los resultados muestran que el crecimiento del micelio de hongos MA está directamente influenciado por el pH del sustrato, esta información es respaldado por Van Aarle *et al.* (2002).

La prueba de Tukey para la longitud de micelio (Figura 13) no muestra diferencias significativas entre las parcelas; donde las muestras procedentes de parcelas de cacao de Lamas y Rioja a 702 y 905 msnm respectivamente, mostraron los valores más altos. Este se debe a la adaptabilidad de la red de micelio micorrízica en muestras colectadas en estas dos provincias. El micelio extraradical sobrevive en variaciones ambientales considerables, que son el pH del suelo, la humedad y la disponibilidad de nutrientes (Smith y Smith, 2011). El papel de los HMA como biofertilizante puede potencialmente fortalecer la adaptabilidad de las plantas al entorno cambiante (Naheeda *et al.*, 2019). Otra de las razones tiene que ver mucho con la fertilización, ya que el micelio micorrízica disminuye con el aumento de la fertilización mineral (Gryndler *et al.*, 2001). Es así que la provincia de Rioja presentó los mejores valores nutricionales básicamente en MO y fósforo; al mismo tiempo que presentó la mayor altitud; como es sabido la altitud es un factor determinante en la configuración de la comunidad de HMA (Yang *et al.*, 2016).

4.3. Correlación de la micorrización y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao

4.3.1. Correlación de la colonización micorrízica y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao

En la Figura 14 se describe que cuando el nivel de cadmio es mayor en las raíces y granos de cacao se reduce la colonización micorrízica cuya correlación es $-0,768$ y $0,079$ respectivamente. Esto se debe al estrés que genera el cadmio en los suelos y sistema radicular de las plantaciones de cacao, tal como lo indica Sandoval-Pineda *et al.* (2020) donde determinaron que cuando los HMA son sometidos a una alta disponibilidad y concentración de cadmio provocan un estrés fisiológico repercutiendo en la estructura de estos hongos.

Es sabido que la presencia de cadmio puede modificar la estructura de la diversidad al cambiar las especies que son muy sensibles y favorecer aquellas que tienen una buena adaptación (Schneider *et al.*, 2016) y limitar la capacidad de los sistemas de raíces para secuestrar nutrientes del suelo y también puede aumentar la absorción de contaminantes (Leyval *et al.*, 1997). Sin embargo, algunas especies de HMA han desarrollado adaptaciones fisiológicas y características genéticas que les permiten sobrevivir en diversas condiciones ambientales, pero la mayoría de los factores estresantes abióticos, incluidos los metales pesados y los elementos metálicos en suelos, pueden reducir la colonización de raíces (Lenoir *et al.*, 2016). Por su parte otros estudios demostraron que el estrés abiótico puede inhibir la germinación de las esporas y evitar que infecten una raíz hospedadora adecuada o interrumpen el proceso de colonización después del contacto con el hospedador tal como lo indica Lijun *et al.* (2021) donde evaluaron la fitorremediación del cadmio asistida por hongos micorrízicos arbusculares en maíz.

Se cree ampliamente que los HMA apoyan de alguna manera el crecimiento y desarrollo de plantas en suelos contaminados con metales pesados, debido a su potencial para fortalecer el sistema de defensa de las plantas mediadas por HMA (Begum *et al.*, 2019). Asimismo, estudios anteriores indican que existe una tendencia notable en la que

el Cd en niveles moderados estimulaba la colonización de micorrizas hasta un cierto umbral en el que se rompe la simbiosis. Los resultados de la investigación apoyan la existencia de un efecto protector de los hongos MA contra el Cd, donde la simbiosis reduce la translocación del Cd en vegetales, especialmente en plantas con una colonización muy alta de MA (Rask *et al.*, 2019).

Chen y Zhao (2007) indican que los tratamientos con micorrizas mejoraron notablemente la absorción de nutrientes, y estos resultados son importantes ya que la deficiencia de nutrientes a menudo ocurre en sitios contaminados con cadmio.

4.3.2. Correlación de la longitud de micelio y contenidos de cadmio en plantaciones de cacao establecido como monocultivo

Cuando la concentración de cadmio es mayor en las raíces y granos de cacao, la longitud del micelio disminuye cuya correlación es -0,1936 y -0,4 respectivamente (Figura 15). Esto se debe al estrés que genera el cadmio en los suelos y sistema radicular de plantas de cacao, tal como lo indica Sandoval-Pineda *et al.* (2020). Los metales pesados pueden inmovilizarse en las hifas de los hongos cuyo origen es interno y externo (Ouziad *et al.*, 2005).

Los resultados descritos anteriormente se evidencian de forma parecida mayormente en suelos contaminados por el factor antrópico, cuyas concentraciones de cadmio son mayores a 2,8 mg.kg⁻¹ (Vogel-Mikuš *et al.*, 2005), lo que provoca la disminución de la riqueza de HFMA.

En lugares cuyas condiciones son extremas en presencia de metales se han demostrado que los HMA tienen la particularidad de adaptarse perfectamente (Weissenhorn *et al.*, 1993). Para aquellos suelos que son enriquecidos de forma natural a altas concentraciones se han encontrado especies que pueden sobrevivir a estas condiciones que generan estrés y otros no debido a la sobrevivencia de cuál se adapta mejor (Millar y Bennett, 2016). Los micelios de diversas especies de HMA poseen una alta capacidad de intercambio

cati3nico y absorci3n de metales (Takács y V3r3s, 2003). En el arroz, los HMA son muy efectivos para reducir los niveles de Cd, lo que provoca la desintoxicaci3n de este metal (Li *et al.*, 2016); asimismo, Vallejos-Torres *et al.* (2021) mostraron que la diversidad de especies de HMA asociadas a plantas de cacao podr3a considerarse una herramienta potencial para inmovilizar el Cd y mejorar el crecimiento en plantas de cacao.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. El Cd en el sistema radicular de plantaciones de cacao mostró correlación positiva y significativa con el pH y correlación positiva no significativa con el K, CIC, Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ . Asimismo, el Cd a niveles altitudinales de 329 y 532 m s.n.m., fueron significativamente más altos con valores de 1,87 y 1,34 mg.kg^{-1} respectivamente, superando el límite máximo permisible.
2. El Cd en granos de cacao mostró correlación positiva mas no significativa con el pH, MO, P, K, CIC, Ca^{2+} y K^+ Mientras que la arcilla y Mg^{2+} mostró una correlación negativa no significativa. El contenido de cadmio en los granos de cacao a niveles altitudinales de 532 y 905 m s.n.m., fueron significativamente más altos con valores de 1,80 y 1,65 mg.kg^{-1} respectivamente superando el límite máximo permisible.
3. La colonización mostró correlación positiva con la arcilla, MO, P y Mg^{2+} . Mientras que el pH presentó correlación negativa significativa; el porcentaje representado por la colonización fue superior al 30 %; hay que entender que porcentajes mayores a 30 se consideran favorables debido a que el hongo benéfico ha colonizado el sistema radicular del cacao; por lo tanto, habrá protección contra el cadmio y otros patógenos. La colonización micorrízica en el cacao como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 702 y 905 m s.n.m., fueron significativamente más altos con valores de 71,32 y 71,44 %, a niveles altitudinales de 329 y 532 m s.n.m. La longitud de micelio mostró correlación positiva no significativa con el P y Mg^{2+} . La longitud de micelio en cacao como monocultivo orgánico a niveles altitudinales de 702 y 905 m s.n.m., fueron significativamente más altos con valores de 14,58 y 14,77 cm respectivamente
4. La colonización micorrízica disminuye a mayor contenido de cadmio en raíces y granos de cacao con correlación de - 0,768 y 0,079 respectivamente; al mismo tiempo que la

longitud de micelio disminuye a mayor contenido de cadmio en raíces y granos de cacao con correlación de - 0,408 y - 0,1936 respectivamente.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Profundizar en las investigaciones sobre la caracterización genética de los hongos micorrízicos arbusculares y su correlación de especies con los niveles de Cd en el suelo, raíces, hojas y almendras de *T. cacao*.
2. Brindar asesorías de educación ambiental a los productores de cacao referente a técnicas de cultivos ecológicos y como estrategia de biorremediación de suelos proponer los hongos micorrízicos.
3. Proponer estrategias de abono como el lombricultivo, de ese modo se evitará los compostajes con los subproductos de restos de parcelas de cacao que pueden estar contaminados con restos de cadmio.
4. Ampliar el estudio en otras áreas aledañas, incluyendo sistemas agroforestales de cacao como orgánico y convencional; cacao como monocultivo orgánico y convencional y clones de cacao como CCN-51 e ICS-39 ya que son cultivares que más se encuentran en las fincas de cacao de la región San Martín.
5. Continuar el estudio considerando parámetros como estrés en las plantaciones de cacao, enzimas antioxidantes como peroxidasa, catalasa, glomalina y su correlación con el contenido de cadmio.
6. Profundizar el estudio sobre la variación del Cd de la cáscara del cacao y los granos y
7. su correlación con las prácticas de manejo, suelo y plantas existentes en los sistemas

agroforestales.

8. Realizar estudios de los contenidos de Cd en fertilizantes y plaguicidas que los productores vienen aplicando en las fincas de cacao y correlacional con el contenido de cadmio, de tal manera se pueda comprobar el efecto de los fertilizantes en su incorporación de cadmio en las plantaciones de cacao.

REFERENCIAS

- Aguirre, R. W., Fischer, G. y Miranda, T. (2011). Tolerancia a metales pesados a través del uso de micorrizas arbusculares en plantas cultivadas. *Revista Colombiana de Ciencias. Hortícolas*. 5, 141-153. <https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i1.1260>.
- Alianza Cacao Perú. (2016). Foro: Desarrollo Alternativo: Intercambio de Experiencia Perú – Colombia. https://www.unodc.org/documents/peruandecuador/DocumentosDA/PeruColombiaDA/1._PRESENTACION_ALIANZA_CACAO_PERU_NNUU.
- Alloway, B.J. (2013). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. *Heavy Metals in Soils*. 22, 11-50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Amores, F., Palacios, A., Jiménez, J. y Zhang, D. (2009). Entorno ambiental, genética, atributos de calidad y singularización del cacao en el nororiente de la provincia de Esmeraldas. Estación Experimental Tropical Pichilingue EC. Boletín Técnico N° 135, 76-85. Recuperado de <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1565>
- Amorim, S. y Valle. R. (1992). Efeito da temperatura radicular na resistência ao movimento de água no cacauero (*Theobroma cacao* L.). *Acta Botânica Brasileira*. 6(1), 55 - 64. doi:10.1590/ S0102-33061992000100004
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C.O., Baligar, V.C. y 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., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A. y Baligar, V. (2015). Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. *PLoS ONE*. 10(8), e0136784. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136784>
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Arévalo, L., Vallejos-Torres, G. y Gonzales, A. (2021). Desarrollo de tecnologías sostenibles del café con hongos micorrízicos arbusculares. ISBN: 978-612-4372-39-1. Tarapoto - San Martín - Perú. [Archivo de datos]. https://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/20.500.12921/623/1/arevalo_manual_2021.pdf

- Ato, M., López, J. y Benavente, A. (2013). Un sistema de clasificación de los diseños de investigación en psicología. *Anales de Psicología*, 29(3), 1038-1059. <https://dx.doi.org/10.6018/analesps.29.3.178511>
- Bali, A.S., Sidhu, G.P.S. y Kumar, V. (2020). Root exudates ameliorate cadmium tolerance in plants: A review. *Environment Chem Lett* 18: 1243–1275. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01012-x>
- Barraza, F., Schreck, E., Leveque, T., Uzu, G., Lopez, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A. y Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution* 229, 950-963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Bateman, A. M. y Muñoz-Rojas, M. (2019). To whom the burden of soil degradation and management concerns. Soil degradation, restoration and management in a global change context. In P. Pereira (Ed.). *Science*, 1-22. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.001>
- Batista, L. (2009). Guía Técnica el Cultivo de Cacao en la República Dominicana. Santo Domingo, República Dominicana. CEDAF. 250 pp. <http://www.cedaf.org.do/publicaciones/guías/download/cacao.pdf> [accedido 10.10.2017].
- Berdugo, S. E. B. (2009). El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1), 123-132. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S169235612009000100014&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N. y Zhang, L. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in plant science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Bonadeo, E y Cantero, A. (2017). El funcionamiento del sistema suelo-planta. Río Cuarto – Argentina. ISBN: 978-987-688-230-9. <http://www.unirioeditora.com.ar/wp-content/uploads/2018/08/978-987-688-230-9.pdf>
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T. y Malajczuck, N. (1996). Working whit mycorrhizas in forestry and agriculture. Canberra, Australia: *New Phytologist*. 135, 783–788. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00703-7.x>

- Chavez, E., He, Z. I., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B. y 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, X.H. y Zhao, B. (2007). Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of Lanthanum in Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.). *Chemosphere* 68(8), 1548-1555. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.068>
- Christensen, T.H. (1984). Cadmium soil sorption at low concentrations. I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. *Water, Air, and Soil Pollution*, 21, 105–114. <https://doi.org/10.1007/BF00163616>
- Chupillón, J. (2017). *Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao (Theobroma cacao L.), para el establecimiento de plantaciones comerciales*, [Tesis de pregrado. Universidad Nacional de San Martín, Perú]. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2473>
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 88(11), 1707-19. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
- Cui, L., Li, L., Zhang, A., Pan, G., Bao, D. y Chang, A. (2011). "Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment," *BioRes*. 6(3), 2605-2618. https://www.researchgate.net/publication/277029911_Biochar_amendment_greatly_reduces_rice_CD_uptake_in_a_contaminated_paddy_soil_A_two-year_field_experiment
- Daymond, A. y Hadley, P. (2004). The effects of temperature and light integral on early vegetative growth y chlorophyll fluorescence of four contrasting genotypes of cacao (*Theobroma cacao*). *Annals of Applied Biology*. 145, 257 - 262. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2004.tb00381.x>
- Dumbrell, A.J., Nelson, M., Helgason, T., Dytham, C. y Fitter, A.H. (2010). Relative roles of niche and neutral processes in structuring a soil microbial community. *The ISME Journal* 4, 337–345
- Duressa, T.F. y Leta, S. (2015). Determination of levels of As, Cd, Cr, Hg and Pb in soils and some vegetables taken from river mojo water irrigated farmland at Koka Village,

Oromia State, East Ethiopia. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*. 21(2), 352-72.

Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O. y Schulin R. (2012). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Sci Total Environ*. 678, 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>.

Ezawa, T., Smith, S. E. y Smith, F. A. (2002). P metabolism and transport in AM fungi. *Plant Soil* 244, 221-230. <https://doi.org/10.1023/A:1020258325010>

Fauziah, C.I., Rozita, O., Zauyah, S., Anuar, A.R. y Shamshuddin, J. (2001). Heavy metals content in soils of peninsular Malaysia grown with cocoa and cocoa tissues. *Malaysian Journal of Soil Science*. 5, 47–58. <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/49579>

García, R. F. (2012). Principales obligaciones medioambientales para la pequeña y mediana empresa. Editorial Club Universitario.
<https://www.edisofer.com/9788484545217-principales-obligaciones-medioambientales-para-la-pequea-y-mediana-empresa>

Gimba, C.E., Ndukwe, G.I., Paul, E.D., Habila, J.D. y Madaki, L.A. (2015). Heavy metals (Cd, Cu, Fe, Mn and Zn,) assessment of groundwater, in Kaltungo LGA, Gombe State, Nigeria. *International Journal of Science and Technology*. 4(2), 49-56
[https://www.semanticscholar.org/paper/Heavy-Metals-\(Cd%2C-Cu%2C-Fe%2C-Mn-and-Zn%2C\)-Assessment-of-Gimba-Ndukwe/656a69bc9ab28339191d45bc63565fb3c8c65c26](https://www.semanticscholar.org/paper/Heavy-Metals-(Cd%2C-Cu%2C-Fe%2C-Mn-and-Zn%2C)-Assessment-of-Gimba-Ndukwe/656a69bc9ab28339191d45bc63565fb3c8c65c26)

González-Chávez, M. C., Carrillo-González, R., Wright, S. F. y Nichols K. A. (2004). The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environ. Pollut.* 130, 317-323.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.004>.

González, P.J., Fernández, D., Plana, R. y Crespo, G. (2007). Efectos del antecedente cultural en las micorrizas nativas y la productividad del pasto brachiaria (*Brachiaria decumbens* cv. Señal). *Pastos y Forrajes*, 30 (1), 1.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942007000100009&lng=es&tlng=es.

González-Huiman, F. (2008). Ecofisiología del Cacao. Tingo Maria - Peru: Diplomado U.N.A.S.
<http://diplomado2007unas.blogspot.com/2008/01/ecofisiologia-del-cacao.html>.

- Gramlich A, Tandy S, Gauggel C, López M, Perla D, Gonzalez V. y Schulín R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science Total Environment*. 15(612), 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>.
- Gramlich, A., Tandy, S. y Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M. y Schulín, 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>.
- Gryndler, M., Hršelová, H., Vosátka, M., Votruba, J. y Klír, J. (2001). La fertilización orgánica cambia la respuesta del micelio de los hongos micorrízicos arbusculares y su esporulación al suministro de NPK mineral. *Folia Microbiol.* 46, 540-542. <https://doi.org/10.1007/BF02817999>
- Guo, F., Ding, C., *et al.* (2018). Stability of Immobilization Remediation of Several Amendments on Cadmium Contaminated Soils as Affected by Simulated Soil Acidification, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.088>
- Hardy, F. (1961). Manual de cacao. (No. 10). Bib. Orton IICA/CATIE. Turrialba-Costa Rica. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A8425e/A8425e.pdf>
- Houben, D., Pircar, J. y Sonnet, P. (2012). Heavy Metal Immobilization by Cost-effective Amendments in a Contaminated Soil: Effects on Metal Leaching and Phytoavailability, *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.10.004>.
- Hoseini, S. M. y Zargari, F. (2013). Cadmium in plants: a review. *International Journal of Farming and Allied Science*, 2, 2002–2004. <http://ijfas.com/wp-content/uploads/2013/09/579-581.pdf>
- Hossein Hammami, Mehdi Parsa, Mohammad Hassan Rashed Mohassel, Salman Rahimi & Sajad Mijani (2016) Weeds ability to phytoremediate cadmium-contaminated soil, *International Journal of Phytoremediation*, 18:1, 48-53, DOI: [10.1080/15226514.2015.1058336](https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1058336)
- Huang, B., Xin, J., Dai, H., Liu, A., Zhou, W., Yi, Y. y Liao, K. (2015). Root morphological responses of three hot pepper cultivars to Cd exposure and their correlations with Cd accumulation. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(2), 1151-9. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3405-7>

International Cocoa Organization (ICCO). (2014). ED (MEM) 964-Direct Dialogue Workshop-Switzerland. Londres: ICCO.
<https://www.icco.org/news/page/6/?avia-element-paging=16>

Järup, L. y Åkesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicol Appl Pharmacol.* 238(3), 201-8.
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.04.020>.

Jung, M. C. y Thornton, I. (1996). Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. *Applied Geochemistry.* 11, 53–59.
[https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00075-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00075-5)

Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soil and plants Fourth edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, U.S. 548. <https://doi.org/10.1201/b10158>

Klein, A.A., Vaissière, B.E., Cane, J.H., Steffan, I., Cunningham, S.A., Kremen, C. y Tscharrntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing lands for world crops. *Proc. Biology Science.* 274, 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

Lachenaud, P., Paulin, D., Ducamp, M. y Thevenin. J. (2007). Twenty years of agronomic evaluation of wild cocoa trees (*Theobroma cacao* L.) from French Guiana. *Scientia Horticulturae.* 113(4), 313 - 321. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.05.016>

Lang, A.L.A. (2001). Relaciones químicas entre organismos: aspectos básicos y perspectivas de su aplicación. Plaza y Valdés. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000023631>

Lenoir, I., Fontaine, J. y Lounes-Hadj, A. (2016). Respuesta de hongos micorrízicos arbusculares al estrés abiótico: una revisión *Fitoquímica*, 123, 4-15. ISSN 0031-9422, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.002>.

Leyval, C., Turnau, K. y Haselwandter, K., (1997). Effect of heavymetal pollution onmycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza*, 7, 139–153. <https://doi.org/10.1007/s005720050174>

Li, H., Luo, N. Zhang, L. J. Zhao, H. M. Li, Y. W. Cai, Q. Y. Wong, M. H y Mo. C. H. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice? *Sci. Total Environ.* 571, 1183-1190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.124>.

- Lijun, H., Zhechao, Z., Baihui, H., Fengwei, D., Jingxia, Z., Zhihua, B. y Wei, Guo. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi alter microbiome structure of rhizosphere soil to enhance maize tolerance to La, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111996. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111996>.
- Liu, L., Li, W., Song, W., y Guo, M. (2018). Remediation Techniques for Heavy Metal-Contaminated Soils: Principles and Applicability, *Science of The Total Environment*, 633, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Luna, J.C., Zapana, J.G., Cutipa, A.M. y Florida, N. (2020). Efecto de la micorriza (*Glomus Intrarradices*), en el rendimiento de dos variedades de papa (*Solanum Tuberosum* L.) en el Altiplano de Puno - Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 58-67. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.535>
- Maddela, N.R., García, LC.; Chakraborty, S.; Venkateswarlu, K. y Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>.
- Martínez, M. y Fernández A. (2004). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. México D.F. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/cambio_climatico_una_vision_desde_mexico_martinez_bremauntz.pdf
- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Gil-Rivero, A. E., Cruz-Castillo, A. y Villena-Zapata, L. (2021). Cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. "cacao" en la región San Martín (Lamas), Perú. *Manglar* 18(2), 169-173. <https://erp.untumbes.edu.pe/revistas/index.php/manglar/article/view/239>
- Meter, A., Atkinson, R.J. y Laliberte, B. (2019). Cadmium in Cacao From Latin America and The Caribbean. A Review of research and potential mitigation solutions. Caracas: CAF. <line://scioteca.caf.com/handle/123456789/1506>.
- Millar, N.S. y Bennett, A. E. (2016). Stressed out symbiotes: hypotheses for the influence of abiotic stress on arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*.182(3), 625-641. Doi: <http://doi.org/10.1007/s00442-016-3673-7>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2014). Guía para el muestreo de suelos. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

- Ministerio Agricultura y Riegos - MINAGRI. (2016). Estudio del cacao en el Perú y en el mundo. Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. Primera Edición. http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GC30WFeu_JMJ:repositorio.minagri.gob.pe/bitstream/handle/MINAGRI/478/cacao.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy+%&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=pe
- Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnol. Adv.* 29(6), 645-53. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.04.006>.
- Mite, F., Carrillo, M. y Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador. XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo. Santo Domingo. Santo Domingo. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/6.-Francisco-Mite.-Cadmio.-INIAP.pdf>
- Motamayor, J., Risterucci, A., Heath, M. Lanaud, C. (2003). Cacao domestication II: progenitor germplasm of the Trinitario cacao cultivar. *Heredity* 91, 322–330. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800298>
- Motamayor, J., Lachenaud, P., Da Silva E Mota, J., Loor, R., Kuhn, D.N. J., Brown, S. y Schnel, R. (2008). Geographic and Genetic Population Differentiation of the Amazonian Chocolate Tree (*Theobroma cacao* L.) *Plus One*. 3(10), 1-8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>.
- Naheeda, B., Cheng, Q., Ahanger, MA., Sajjad, R., Khan, M.I., Ishfaq, M., Ashraf, A. N. y Lixin, X. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.01068>
- Nicolson, T. y Schenck, N. (1979). Endogonaceous Mycorrhizal Endophytes in Florida. *Mycologia*, 71(1), 178-198. <https://doi.org/10.2307/3759231>
- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., and 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>
- Ouziad, F., Hildebrandt, U., Schmelzer, E. y Bothe, H. (2005). Expresiones de genes diferenciales en tomates colonizados por micorrizas arbusculares cultivados bajo estrés por metales pesados. *J. Plant Physiol.* 162, 634–649. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.09.014>

- Palus J, Rydzynski K, Dziubaltowska E, Wyszynska K, Natarajan AT, Nilsson R (2003) Genotoxic effects of occupational exposure to lead and cadmium. *Mutat. Res.* 540: 19-28.
- Pereira, R, Furtado, A.A., Silva, L., Mangabeiraa, P.A.O., Souza, J.O., Pirovania, C.P., Ahnerta, D. y 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>
- Perfecto, I. y Vandermeer, J. (2010). The agroecological matrix as alternative to the land-sparing/agriculture intensification model. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107, 5786–5791. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905455107>
- Pérez, A., Rojas, J. y Montes, D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el Caribe colombiano. *Revista Colombiana Ciencia Animal*, 3 (2): 366-85. <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/view/412/454>
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. (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), 158–161. [https://doi.org/10.1016/s0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/s0007-1536(70)80110-3).
- Pozo, M.J. y Azcon-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Curr. Opin. Plant Biol.* 10, 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.05.004>.
- Qiu, Y.W., Yua, K.F., Zhang, G. y Wang, W.X. (2011). Accumulation and partitioning of seven trace metals in mangroves and sediment cores from three estuarine wetlands of Hainan Island, China. *Journal of Hazardous Materials*, 190, 631-638. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.091>
- Quiñones, M., Espinoza, E., Yovera, F., Cuchilla, Y. y Castro, D. (2018). Identificación, georreferenciación y caracterización morfológica de árboles superiores de *Theobroma cacao* L. cultivar cacao blanco de Piura, Perú. *The Biologist*. <http://revistas.unfv.edu.pe/index.php/rtb/article/view/225/219>
- Ramtahal, G., Umaharan, P., Hanuman, A., Davis, C. y Ali, L. (2019). The effectiveness of soil amendments, biochar and lime, in mitigating cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment* 693, 1335-1363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.369>

- Ramtahal, G., Chang, I., Ahmad, N., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K., Lawrence, W. y Harrynanan, Lisa. (2015). Prediction of Soil Cadmium Bioavailability to Cacao (*Theobroma cacao* L.) using Single-Step Extraction Procedures. In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 46(20), 2585-2594. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1089262>
- Rask, K. A., Johansen, J. L., Kjølner, R. y Ekelund, F. (2019). Differences in arbuscular mycorrhizal colonisation influence cadmium uptake in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.022>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de: <https://www.R-project.org/> (Accessed September 2021).
- Restrepo, K. J., Montoya, M. I., Henao Jaramillo, P. G., Lina A. y Molina, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica)*, 37(1), 35-44. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>
- Roa-Romero, H. A., Salgado-Mora, M. G., y Alvarez-Herrera, J. (2009). análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas - México. *Acta Biológica Colombiana*, 14(3), 97-110. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2009000300007&lng=en&tlng=es.
- Robles, C. (2009). Variación temporal de la diversidad de hongos de micorriza arbuscular y el potencial micorrícico en especies silvestres de Agave en Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional (IPN). 80. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream>
- Salmanzadeh, M., Hartland, A. et al. (2017), Isotope Tracing of Long-Term Cadmium Fluxes in an Agricultural Soil, *Environmental Science y Technology*, 51(13), 7369-7377. doi: 10.1021/acs.est.7b00858
- Sánchez-Mora, F.D., Medina-Jara, S. Díaz-Coronel, M., Gorki T., Ramos-Remache, R. A., Vera-Chang, J.F., Vásquez-Morán, V. F., Troya-Mera, F.A., Garcés-Fiallos, F. R. y Onofre-Nodari, R. (2015). Potencial sanitario y productivo de 12 clones de cacao en Ecuador. *Revista fitotecnia mexicana*, 38(3), 265-274. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000300005&lng=es&tlng=es.
- Sandoval-Pineda, J.F., Pérez-Moncada, U.A., Rodríguez, A. y Torres, E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas

arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biol Colomb.* 25(3), 333-344. Doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>

Sauve, S., Henderson, W. y Allen, H.E. (2000). Solid Solution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. *Environmental Science Technology*, 34, 1125–1131.

Sena-Gomes, A. R. y Kozlowsky, T.T. (1987). Effects of temperature on growth and water relations of cacao (*Theobroma cacao* var. Comum) seedlings. *Plant and Soil.* 103, 3 - 11. <https://doi.org/10.1007/BF02370661>.

Seregin I.V. y Ivanov V.B. (1997). Is the endodermal barrier the only factor preventing the inhibition of root branching by heavy metal salts? *Russian Journal of Plant Physiology.* 44(6), 797-800

Schneider, M., Andres, C., Trujillo, G., Alcon, F., Amurrio, P., Perez, E., Weibel, F. y Milz, J., (2016). Cocoa and total system yields of organic and conventional agroforestry vs. monoculture systems in a long-term field trial in Bolivia. *Exp. Agric.* <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479716000417> (In Press).

Sinha, S., Mishra, R.K., Sinam, G. y Mallick, S. (2013). Comparative evaluation of metal phytoremediation potential of trees, grasses, and flowering plants from Tannery-wastewater-contaminated soil in relation with physicochemical properties. *Journal Soil. Contamination.* 22, 958–983. <https://doi.org/10.1080/15320383.2013.770437>.

Smith, S.E. y Smith, F.A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology* 62, 227–250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>

Stevenson, C., Corven J. y Villanueva G. (1993). Manual para el análisis de cacao en el laboratorio. Costa Rica. IICA PROCACAO. 26, 60-65. Recuperado de <https://repositorio.iica.int/handle/11324/8995>

Song, N., Wang, F., Ma, Y. y Tang, S. (2015). Using DGT to assess cadmium bioavailability to ryegrass as influenced by soil properties. *Pedosphere.* 25, 825e833. [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30063-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30063-1).

Sousa, V., Driessnack, M., Amélia, I. y Costa Mendes, C. (2007). Una descripción general de los diseños de investigación relevantes para la enfermería: Parte 1: diseños de investigación cuantitativos. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 15(3), 502-507. <https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300022>

- Tadeo, F. y Gómez-Cadenas, A. (2008). Fisiología de las plantas y el estrés. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón (eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana. p. 577 – 597.
- Takács, T. y Vörös, I. (2003). Efecto de hongos micorrízicos arbusculares no adaptados a metales sobre la absorción de Cd, Ni y Zn por el raigrás. *Acta Agron. Colgado*. 51, 347–354. Doi. 10.1556/AAgr.51.2003.3.13
- Tennant, D. (1975), A Test of a Modified Line Intersect Method of Estimating Root Length. *Journal of Ecology*, 63(3), 995-1001. <http://www.jstor.org/stable/2258617>
- Torres, N., Antolín, M.C. y Goicoechea, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal symbiosis as a promising resource for improving berry quality in grapevines under changing environments. *Frontiers in Plant Science* 9, 987. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00897>
- Toxopeus, H. (1985). Botany, types and populations. In: Wood GAR, Lass RA, eds. *Cocoa*. 4th edition. Oxford: Blackwell Science Ltd, 11–37.
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N. y Marín, C. (2021). High genetic diversity in arbuscular mycorrhizal fungi influence cadmium uptake and growth of cocoa plants. *Bioagro*, 34(1), 75-84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- Vallejos-Torres, G., Espinoza, E., Marín-Díaz, J. Solis, R. y Arévalo, L. (2021). The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Against Root-Knot Nematode Infections in Coffee Plants. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 364–373 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00366-z>
- Vallejos-Torres, G., T. Sánchez, M.A. García, M. Trigoso y L.A. Arévalo. (2019). Efecto de hongos formadores de micorrizas arbusculares en clones de café (*Coffea arabica*) variedad Caturra, *Acta Agronómica*, 68(4):278-284. <https://dx.doi.org/10.15446/acag.v68n4.72117>
- Van Aarle, I.M., Olsson, P.A. y Söderström, B. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi respond to the substrate pH of their extraradical mycelium by altered growth and root colonization. *New Phytologist* 155, 173–182. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00439.x>
- Vargas, P., Ciobota, V., Salinas, W., Kampe, B., Aponte, PM., Rosch, P., Popp, J. y Ramos, L.A. (2016). Distinction of Ecuadorian varieties of fermented cocoa beans using Raman

- Vogel-Mikuš, K., Drobne, D. y Regvar M. (2005). Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. *Environ Pollut.* 133(2), 233-242. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.021>
- Walkley, A. y Black. I.A. (1934). An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science.* 37(1), 29-37. <https://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, P., Deng, X., Huang, Y., Fang, X., Zhang, J., Wan, H. y Yang, C. (2015). Comparison of subcellular distribution and chemical forms of cadmium among four soybean cultivars at young seedlings. *Environmental Science and Pollution Research.* 22(24), 19584-19595. <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5126-y>
- Wang, B., Liu, L., Gao, Y. y Chen, J. (2009). Improved phytoremediation of oilseed rape (*Brassica napus*) by *Trichoderma mutant* constructed by restriction enzyme-mediated integration (REMI) in cadmium polluted soil. *Chemosphere*, 74, 1400-1403. <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.027>
- Wang, A. S., Angle, J. S., Chaney, R. L., Delorme, T. A. y Reeves, R. D. (2006). Soil Ph effects on uptake of Cd an Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant and soil*, 281(1), 326-337. <https://dx.doi.org/10.1007/s11104-005-4642-9>
- Weissenhorn, I., Leyval, C. y Berthelin, J. (1993). Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils. *Plant Soil.* 157(2), 247-256. <https://dx.doi.org/http://doi.org/10.1007/BF00011053>
- Wickramasuriya, A.M. y Dunwell, J.M. (2018). Cacao biotechnology: Current status and future prospects. *Plant Biotechnology Journal.* 16(1), 4-17. <https://dx.doi.org/10.1111/pbi.12848>.
- Wipf, D., Krajinski, F., Tuinen, D.V, Recorbet, G. y Courty, P. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal Networks. *New Phytologist* 223, 1127–1142. <https://dx.doi.org/10.1111/nph.15775>.
- Yang, Z., Wu, Z., Liao, Y., Liao, Q., Yang, W. y Chai, L. (2017). Combination of microbial oxidation and biogenic schwertmannite immobilization: A potential remediation for

highly arsenic-contaminated soil. *Chemosphere*. 181, 1-8.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.041>.

- Yang, W., Zheng, Y., Gao, C. Ji-Chuang, D., Shi-Ping, W. y Liang-Dong, G. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal community composition affected by original elevation rather than translocation along an altitudinal gradient on the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientific Reports*. 6: 36606. <https://doi.org/10.1038/srep36606>
- Yasir, H., Lin, T., Muhammad, I.S., Xuerui, C., Bilal, H., Muhammad, Z.A., Muhammad, U., Zhen-li, H. y Xiaoe, Y. (2019). An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain. *Sci. Total. Environment*. 660, 80–96. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.419>.
- Zarcinas, B.A., Ishak, C.F., McLaughlin, M.J. y Cozens, G. (2004). Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia: 1. Peninsular Malaysia. *Environ Geochem Health* 26, 343e357. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-005-4669-0>.
- Zhang, W., Ricketts, T., Kremen C. y Swinton, S., Lupi, F., Robertson, G. y Hamilton, S. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*. 64, 253–260. [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921-8009\(07\)00146-2](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921-8009(07)00146-2)
- Zeng, X., Wu, L., Li, W., Zhu, S., Wei, B., Tang, J. y Tan, Y. (2017). Characterization of strain cupriavidus sp. zsk and its biosorption of heavy metal ions. *Journal Biobased Mater. Bio*. 11, 154–158. <https://dx.doi.org/10.1166/jbmb.2017.1649>.
- Zug, K.L.M., Huamaní-Yupanqui, H.A., Meyberg, F., Cierjacks, J.S. y Cierjacks, A. (2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation. *Water Air Soil Pollut* 230, 72. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4109-x>

TERMINOLOGÍA

Absorción de cadmio: El Cd entra a la planta principalmente en forma de Cd^{2+} , ya que sus iones quelatos, generalmente, no están disponibles para la absorción por las raíces. La capa de células epidérmicas es el primer tejido para la captación de iones y dentro de ella, los pelos radicales son la zona más activa para absorber iones del suelo y es la estructura que facilita la absorción de Cd^{2+} (Seregin y Ivanov, 1997).

Adaptaciones de las plantas al Cadmio: Las adaptaciones específicas de las plantas al estrés por Cd se basan en dos mecanismos principales; algunas evitan o regulan la entrada y transporte del mismo (Duressa y Leta, 2015), y otras toleran determinados contenidos de Cd, a través de su detoxificación, mediante quelación en orgánulos intracelulares (Clemens, 2006).

Cambio climático: Es aquel problema que posee ciertas características únicas con naturaleza global cuyos mayores impactos se evidencia a largo plazo, asimismo engloba las interacciones complejas en los procesos naturales, sociales, políticos y económicos a nivel mundial (Martínez y Fernández, 2004).

Cacao monocultivo: Se refiere a un sistema muy disperso en los trópicos en lo cual no existe implementación de sombra, de tal modo el cultivo es expuesto a plena luz solar de esa manera se logra mayor producción, sin embargo, también es necesario mayores nutrientes en el suelo, así mismo cabe mencionar que en los países templados fue considerado como perjudicial (Hardy, 1961).

Hongos micorrízicos arbusculares: Son microorganismos del suelo que forman simbiosis con el 80 % de las plantas terrestres, formando arbusculos, vesículas (en algunas especies) e hifas dentro de las células corticales de las plantas que colonizan. Esta asociación simbiótica entre el hongo y planta, actúa como complemento de la raíz de la planta en la toma de nutrientes (Berdugo, 2009).

Movimiento del Cadmio en raíces: Las plantas evitan la entrada de Cd inmovilizándolo en la pared celular de las raíces a través de enlaces con exudados extracelulares, como ácidos poligalacturónicos y esto limita su transporte a la parte aérea (Wang *et al.*, 2015).

Rizosfera: Es aquel entorno que se encuentra influido tanto biológicamente y bioquímicamente por las raíces de la planta, lugar donde se proliferan y compiten los microorganismos, algunos de los microorganismos proporcionan grandes beneficios ya que favorecen al transporte de nutrientes produciendo hormonas y contribuyendo al control de patógenos (Lang, 2001).

Simbiosis micorrízica: La simbiosis micorrízica corresponde a una asociación mutualista antigua entre hongos y raíces de la mayoría de las plantas terrestres (Arévalo *et al.*, 2021).

Sistema suelo-planta: Corresponde al análisis de las relaciones entre el comportamiento de los vegetales y las propiedades del sistema suelo en sus diferentes niveles de organización física y morfológica, y para las distintas unidades del paisaje que integra (Bonadeo y Cantero, 2017).

Suelo Contaminado: Un suelo contaminado es aquel cuyas características han sido vulneradas de manera negativa debido a la presencia de compuestos químicos con carácter peligroso de origen humano, en ciertas concentraciones constituye un riesgo tanto para la salud humana y medio ambiente (García, 2012).

APÉNDICES

Apéndice 1. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Mariscal Cáceres.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR – CADMIO

N° SOLICITUD : AF0010-02-21
 SOLICITANTE : GEOMAR VALLEJOS TORRES
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - MARISCAL CACERES
 TEJIDO VEGETAL : RAIZ DE CACAO

FECHA DE MUESTREO : 15/03/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 31/03/2021
 FECHA DE REPORTE : 08/04/2021

ITEM	Número de Muestra			CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo	
01	21	03	0371 MC-1 MARISCAL CACERES	1.81
02	21	03	0372 MC-2 MARISCAL CACERES	2.00
03	21	03	0373 MC-3 MARISCAL CACERES	1.81
04	21	03	0374 SAFI-1 MARISCAL CACERES	1.25
05	21	03	0375 SAFI-2 MARISCAL CACERES	1.21
06	21	03	0376 SAFI-3 MARISCAL CACERES	1.52

METODOLOGIA:
 CADMIO : Digestion HNO3 / Espectr. Absorción Atómica

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.
 *Los Calculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 08 de Abril del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU

 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Activar W
 Ve a Configu

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 2. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de El Dorado.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR - CADMIO

N° SOLICITUD : AF0012-02-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : EL DORADO
 TEJIDO VEGETAL : RAIZ DE CACAO

FECHA DE MUESTREO : 26/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 07/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 13/05/2021

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	21	05	0584	MONOCULTIVO - M1	1.48
02	21	01	0585	MONOCULTIVO - M2	1.34
03	21	01	0586	MONOCULTIVO - M3	1.21

METODOLOGIA:
 CADMIO : Digestion HNO₃ / Espectr. Absorción Atómica

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.
 *Los Calculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 13 de Mayo del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU

Cesar O. Arévalo Hernandez, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Activar Windows
 Ve a Configuración para acti

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 3. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Lamas



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR - CADMIO

N° SOLICITUD : AF0012-01-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : LAMAS
 TEJIDO VEGETAL : RAIZ DE CACAO

FECHA DE MUESTREO : 26/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 07/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 13/05/2021

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	21	05	0581	MONOCULTIVO - M1	0.64
02	21	01	0582	MONOCULTIVO - M2	0.84
03	21	01	0583	MONOCULTIVO - M3	0.58

METODOLOGIA:
 CADMIO : Digestion HNO3 / Espectr. Absorción Atómica

La Banda de Shilcayo, 13 de Mayo del 2021

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.
 *Los Calculos estan en base a materia seca.

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARPATO - PERU

Cesar O. Arevalo Hernandez, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 4. Análisis de cadmio en raíces de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Rioja.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR – CADMIO

Nº SOLICITUD : AF0010-01-21
 SOLICITANTE : GEOMAR VALLEJOS TORRES
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - RIOJA
 TEJIDO VEGETAL : RAIZ DE CACAO

FECHA DE MUESTREO : 15/03/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 31/03/2021
 FECHA DE REPORTE : 08/04/2021

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	21	03	0365	MC-1 RIOJA	0.76
02	21	03	0366	MC-2 RIOJA	1.13
03	21	03	0367	MC-3 RIOJA	1.11
04	21	03	0368	SAFI-1 RIOJA	1.32
05	21	03	0369	SAFI-2 RIOJA	1.25
06	21	03	0370	SAFI-3 RIOJA	1.32

METODOLOGIA:
 CADMIO : Digestion HNO3 / Espectr. Absorción Atómica

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.
 *Los Calculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 08 de Abril del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU

 Cesar O. Arroyo Hernandez, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Activar Wind
 Ve a Configuración

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 5. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Mariscal Cáceres.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO

N° SOLICITUD : AA0003-04-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : MARISCAL CACERES
 ALIMENTO : GRANO DE CACAO SECO

FECHA DE MUESTREO : 20/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 17/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 25/05/2021

Item	Número de Muestra			Usuario	CADMIO ppm
	Laboratorio				
01	21	05	0028	MONOCULTIVO -M1	0.5
02	21	05	0029	MONOCULTIVO -M2	0.6

MÉTODOS:
 CADMIO : Digestion HNO₃:H₂O₂ (2:1) / Espectr. Absorción Atómica

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología utilizada en el muestreo.

La Banda de Shilcayo, 25 de Mayo del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 I.C.T. - S.A. - S.P.A.

 Dr. Enrique Arevalo Gardini
 Coordinador General

Activar V
 Ve a Config

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 6. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de El Dorado



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO

N° SOLICITUD : AA0003-01-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : EL DORADO
 ALIMENTO : GRANO DE CACAO SECO

FECHA DE MUESTREO : 27/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 17/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 25/05/2021

Item	Número de Muestra			CADMIO ppm
	Laboratorio		Usuario	
01	21 05	0022	MONOCULTIVO -M1	2.1
02	21 05	0023	MONOCULTIVO -M2	1.5

METODOS:
 CADMIO : Digestion HNO₃:H₂O₂ (2:1) / Espectr. Absorción Atómica

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología utilizada en el muestreo.

La Banda de Shilcayo, 25 de Mayo del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 Dr. Enrique Arévalo Gardin
 Coordinador General

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 7. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Lamas.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO

N° SOLICITUD : AA0003-03-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : LAMAS
 ALIMENTO : GRANO DE CACAO SECO

FECHA DE MUESTREO : 25/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 17/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 25/05/2021

Item	Número de Muestra			CADMIO ppm	
	Laboratorio		Usuario		
01	21	05	0026	MONOCULTIVO -M1	0.3
02	21	05	0027	MONOCULTIVO -M2	0.4

METODOS:
 CADMIO : Digestion HNO3:H2O2 (2:1) / Espectr. Absorción Atómica

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología utilizada en el muestreo.

La Banda de Shilcayo, 25 de Mayo del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

 Dr. Enrique Arevalo Gardin
 Coordinador General

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 8. Análisis de cadmio en granos de plantaciones de cacao como monocultivo en la provincia de Rioja.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO

N° SOLICITUD : AA0003-02-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : RIOJA
 ALIMENTO : GRANO DE CACAO SECO

FECHA DE MUESTREO : 24/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 17/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 25/05/2021

Item	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Usuario		
01	21	05	0024	MONOCULTIVO -M1	1.5
02	21	05	0025	MONOCULTIVO -M2	1.8

MÉTODOS:
 CADMIO : Digestion HNO3:H2O2 (2:1) / Espectr. Absorción Atómica

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología utilizada en el muestreo.

La Banda de Shilcayo, 25 de Mayo del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

 Dr. Enrique Arcevalo Gardin
 Coordinador General de la Configuración

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 9. Análisis de caracterización de suelos en plantaciones de cacao como monocultivo.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI Nº 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS – CARACTERIZACIÓN

Nº SOLICITUD : AS0101-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : EL DORADO
 CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 21/04/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 07/05/2021
 FECHA DE REPORTE : 11/05/2021

Item	Número de la muestra				pH	C.E dS/m	CaCO ₃ (%)	M.O. (%)	N. (%)	P (ppm)	K (ppm)	ANÁLISIS MECÁNICO			CLASE TEXTURAL	CIC pH 7.0	CATIONES CAMBIABLES					Suma de bases	% Sat. de bases	% Sat. de Al ³⁺
	Lab.											Arena	Limo	Arcilla			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H ⁺			
01	21	05	0648	MONOCULTIVO -M1	6.91	0.25	2.20	4.52	0.20	12.80	224	47.68	23.28	29.04	Fra-Arc-Are	16.98	15.00	1.31	0.57	0.10	0.00	16.98	100.0	0.0
02	21	05	0649	SAF-M1	6.50	0.27	1.65	5.32	0.24	14.00	430	26.68	32.28	41.04	Arc	31.49	25.15	2.95	1.10	0.09	0.00	29.29	93.0	0.0

MÉTODOS:	
TEXTURA	: HIDRÓMETRO
pH	: POTENCIÓMETRO SUSPENSIÓN SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
CONDUCT. ELÉCTRICA	: CONDUCTÍMETRO SUSPENSIÓN SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	: GAS - VOLUMÉTRICO
FOSFORO DISPONIBLE	: OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO ₃ a 0.5M, pH 8.5 Exp. Vis.
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	: (NH ₄) ₂ SO ₄ -COOH-H ⁺ , pH 7, Absorción Atómica
MATERIA ORGÁNICA	: WALKLEY Y BLACK
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	: EXTRACT. KClO ₄ -NH ₄ OH/NaOH-CO ₂ H ⁺ N, pH 7, Absorción Atómica
ACIDEZ INTÉRC.	: EXTRACT. KCl 1N, VOLUMÉTRICO
ACIDEZ POTENCIAL	: WOODRUFF MODIFICADO
CIC pH 7.0	: ACIDEZ POTENCIAL+GUMA DE BADES
Fe, Cu, Zn y Mn	: OLSEN Modificado extrac. NaHCO ₃ a 0.5M, pH 8.5 Absorción Atómica
BORO	: Extracción / Espectrometría UV-Vis (λ=555 nm)
AZUFRE	: Extracción / Turbidimetría (λ=420 nm)
METALES PESADOS	: EPA 3050B

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la serie de la muestra del presente reporte.

La Banda de Shilcayo, 11 de Mayo del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERÚ

Cesar O. Arávalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

Apéndice 10. Base de datos de análisis de cadmio en raíces y granos de plantaciones de cacao como monocultivo.

Número de parcelas	Provincias	Altitudes (m.s.n.m.)	Clave	Cadmio en Raíz (mg.kg ⁻¹)	Cadmio en Granos (mg.kg ⁻¹)
1	Mariscal Cáceres	329	M.CÁCE_329	1,81	0,50
				2,00	0,60
				1,81	0,55
2	El Dorado	532	EL.DOR_532	1,48	2,10
				1,34	1,50
				1,21	1,80
3	LAMAS	702	LAMAS_702	0,64	0,30
				0,84	0,40
				0,58	0,35
4	Rioja	905	RIOJA_905	0,76	1,50
				1,13	1,80
				1,11	1,65

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 11. Base de datos de colonización y micelio micorrízica en plantaciones de cacao como monocultivo.

Número de parcelas	Provincias	Altitudes (msnm)	Clave	Colonización (%)	Longitud de micelio (cm)
1	Mariscal Cáceres	329	M.CÁCE_329	61,66	14,90
				51,00	13,76
				63,30	10,89
2	El Dorado	532	EL.DOR_532	65,00	12,10
				60,00	14,40
				63,33	11,50
3	LAMAS	702	LAMAS_702	71,30	14,38
				75,00	13,56
				67,66	15,80
4	Rioja	905	RIOJA_905	71,00	14,27
				75,00	13,86
				68,33	16,19

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 12. Base de datos de caracterización (Análisis de suelos) en plantaciones de cacao como monocultivo.

Número de parcelas	Provincias	Altitudes (msnm)	Clave	pH	Arcilla (%)	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)	CIC (cmol kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol kg ⁻¹)
1	Mariscal Cáceres	329	M.CÁCE_329	6,48	29,04	2,33	5,83	103,00	31,06	18,77	4,67	0,26
				6,92	32,04	2,29	4,70	98,00	16,47	15,51	0,57	0,25
				5,96	56,48	5,16	12,88	355,00	33,52	26,47	2,03	0,91
2	El Dorado	532	EL.DOR_532	6,91	29,04	4,52	12,80	224,00	16,98	15,00	1,31	0,57
				6,50	41,04	5,32	14,00	430,00	31,49	25,15	2,95	1,10
				6,71	35,04	4,92	13,40	327,00	24,24	20,08	2,13	0,84
3	LAMAS	702	LAMAS_702	6,16	65,04	4,78	9,78	159,00	25,21	18,07	2,17	0,41
				5,76	48,48	2,35	2,50	38,00	13,16	7,49	1,46	0,10
				5,35	44,48	3,87	10,38	161,00	17,90	7,11	2,26	0,41
4	Rioja	905	RIOJA_905	5,96	32,04	4,50	20,30	47,00	21,59	14,36	2,96	0,12
				6,05	41,04	3,89	18,05	39,00	16,44	8,75	2,26	0,10
				5,27	36,48	5,87	45,00	68,00	20,88	12,76	1,81	0,17

Fuente: Elaboración propia.