

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Rol de las micorrizas arbusculares sobre la presencia de cadmio en plantaciones de “cacao” *Theobroma cacao* Linnaeus. San Martín, Perú

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

AUTORES

Irma Eliszth Huanangue Guerrero

María del Pilar Navarro Casique

ASESOR

Geomar Vallejos Torres

Rioja, Perú

2023

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° 040 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 05:00 p.m. del lunes 16 de octubre de 2023, a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. Amada Victoria Larco Aguilar | Presidente |
| 2. Juan Ignacio Pastén Monárdez | Primer miembro |
| 3. David Patrick León Chang | Segundo miembro |
| 4. Geomar Vallejos Torres | Asesor(a) |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Rol de las micorrizas arbusculares sobre la presencia de cadmio en plantaciones de "cacao" *Theobroma cacao* Linnaeus. San Martín, Perú**, que presentan las bachilleres en Ciencias Ambientales, **Irma Eliszth Huanangue Guerrero y María del Pilar Navarro Casique**, 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 **BUENA** 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 octubre de 2023.

Amada Victoria Larco Aguilar
Presidente

Juan Ignacio Pastén Monárdez
1° miembro

David Patrick León Chang
2° miembro

Geomar Vallejos Torres
Asesor(a)

Anexo 2**CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO**

Ciudad, Rioja del 30 de noviembre de 2023

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ingeniería Agraria

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con título: **Rol de las micorrizas arbusculares sobre la presencia del cadmio en plantaciones de "cacao" *Theobroma cacao* Linnaeus. San Martín Perú**, presentado por la **Bachiller Irma Eliszth Huanangue Guerrero** con (código de estudiante **2014101843** y DNI **73700878**) Y la **Bachiller María del Pilar Navarro Casique** con (código de estudiante **2014101896** y DNI **73129383** para optar el título profesional/grado académico de **Ingeniería Ambiental** ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 0 %**.* Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y **adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin**, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'W. Mendoza', is written over a horizontal line.

Firma del Asesor (a)

DNINº: 01162440

ORCID: 0000-0001-7084-977X

Facultad de Ingeniería Agraria - UCSS

* De conformidad con el artículo 8º, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8º. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme vida y salud para lograr cumplir mis objetivos, guiarme y acompañarme siempre en los momentos más difíciles brindándome la fortaleza para concluir mi carrera profesional con éxito.

A mis padres Policarpio Huanangue Gil y Mercy Guerrero Flores, por ser los seres más importantes y el motivo principal de todos mis logros, haberme inculcado buenos valores y enseñado a ser perseverante no rendirme en cualquier circunstancia de la vida, apoyándome siempre en los momentos buenos y malos.

A mi compañero de vida y mi pequeña hija Mara, por ser mi motivo de superación.

A mis Docentes por compartir sus conocimientos y formarme profesionalmente con cada enseñanza brindada a lo largo de toda la carrera universitaria.

Irma Elizth Huanangue Guerrero

A Dios, por haberme dado la vida y permitido culminar mi carrera profesional con éxito.

A mi madre Paulita Casique Saboya, por el ser el pilar más importante y demostrarme siempre su cariño y su apoyo incondicionalmente a lo largo de toda mi carrera universitaria. Por los valores inculcados para ser de mí una persona de bien ante la sociedad.

A mi abuelito Pablo Casique Bardalez, que, a pesar de la distancia física, sé que desde el cielo guía mis pasos y celebra este logro.

María del Pilar Navarro Casique

AGRADECIMIENTOS

A La Universidad Católica Sedes Sapientiae que reconoce el apoyo financiero del proyecto Concytec – Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora Fondecyt, en el marco de las actividades del proyecto “Biorremediación con micorrizas arbusculares nativas en el control del cadmio de clones de *Theobroma cacao* L. como estrategia sostenible a la seguridad alimentaria ecológica en la amazonia peruana” con Contrato 105–2018 – FONDECYT – BM – IADT – AV.

Irma Elizth Huanangue Guerrero

A la Universidad Nacional de San Martín (UNSM) como entidad asociada del proyecto por habernos brindado acceso a los ambientes del laboratorio de Biología y Genética Molecular (LBGM).

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) Beca 18, por brindarnos la oportunidad de acceder a estudiar una carrera universitaria y cumplir uno de nuestros objetivos.

A nuestro asesor el Doctor Geomar Vallejos Torres por su constante apoyo en la ejecución de la tesis.

María del Pilar Navarro Casique

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. Internacional.....	4
1.1.2. Nacional.....	9
1.2. Bases teóricas especializadas.....	14
1.2.1. Origen del “cacao”.....	14
1.2.2. “Cacao” en el Perú.....	14
1.2.3. Fenología del cultivo de “cacao”.....	15
1.2.4. Variedades de “cacao”.....	15
1.2.5. Sistemas agroforestales asociados al “cacao”.....	17
1.2.6. Condiciones edafoclimáticas para el crecimiento del “cacao”.....	18
1.2.7. Efectos del cadmio (Cd) en plantas.....	20
1.2.8. Relación suelo y cadmio (Cd).....	20
1.2.9. Relación sistema agroforestal y cadmio (Cd).....	21
1.2.10. Factores de suelo y cadmio (Cd) en plantaciones de “cacao”.....	21
1.2.11. Cadmio (Cd) en suelos.....	22
1.2.12. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas.....	22
1.2.13. Micorrizas arbusculares y reducción de cadmio (Cd) en el cultivo de “cacao”.....	23
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1. Diseño de la investigación.....	24

2.2. Lugar y fecha.....	24
2.3. Población y muestra	24
2.4. Análisis estadístico de datos	25
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	26
2.5.1. Muestreo de suelo	26
2.5.2. Colonización micorrízica	27
2.5.3. Intensidad micorrízica.....	27
2.5.4. Evaluación de longitud de micelio extraradical (MER).....	27
2.5.5. Extracción de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)	28
2.6. Descripción de la investigación.....	28
2.6.1. Descripción de la actividad en campo.....	28
2.7. Descripción de la actividad en vivero	41
2.9. Identificación de variables y su mensuración.....	48
2.10. Materiales y equipos	50
CAPÍTULO III: RESULTADOS	51
3.1. Contenido de cadmio (Cd) en suelo, hojas y granos en “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51.....	51
3.1.1. Contenido de cadmio (Cd) en suelos	51
3.1.2. Contenido de cadmio (Cd) en hojas	53
3.1.3. Contenido de cadmio (Cd) en granos.....	55
3.2. Colonización micorrízica, micelio y densidad de esporas de HMA en “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico.....	57
3.2.1. Colonización micorrízica	57
3.2.2. Micelio extraradical	59
3.2.3. Número de esporas.....	61
3.3. Correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en suelos, con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico.....	63
3.4. Correlación de las micorrizas arbusculares y el contenido de cadmio en hojas y granos de “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico	65
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN.....	67
4.1. Contenido de cadmio (Cd) en suelo, hojas y granos en “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico.....	67

4.2. Colonización micorrízica, micelio y densidad de esporas de HMA en “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico.....	69
4.3. Correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en suelos en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico.....	71
4.4. Correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en hojas y granos de “cacao” en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico.....	73
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	75
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS	78
TERMINOLOGÍA	95
APÉNDICES	97

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Descripción de tratamientos en estudio.....	25
Tabla 2 Georreferenciación de plantaciones de “cacao”	31
Tabla 3 Métodos utilizados en laboratorio para realizar la caracterización del suelo.....	42
Tabla 4 Identificación de variables.....	49
Tabla 5 Análisis de varianza para el contenido de cadmio en suelo de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo.....	51
Tabla 6 Análisis de varianza para el contenido de cadmio en hojas de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo.....	54
Tabla 7 Análisis de varianza para el contenido de cadmio en granos de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo.....	56
Tabla 8 Análisis de varianza para la colonización micorrízica de raíces de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo.....	58
Tabla 9 Análisis de varianza para la longitud de micelio extraradical en raíces de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo.....	60
Tabla 10 Análisis de varianza para el número de esporas de HMA en “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo.....	62
Tabla 11 Correlación entre indicadores micorrízicos y características químicas de suelos	64
Tabla 12 Ecuación de regresión que relacionan indicadores micorrízicos con características químicas del suelo	64
Tabla 13 Correlación entre la cantidad de Cd (ppm) en la planta e indicadores micorrízicos	65
Tabla 14 Ecuaciones de regresión para la cantidad de Cd (ppm) en la planta de “cacao” con los indicadores micorrízicos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Mapa de ubicación geográfica del área de estudio.....	30
Figura 2 Identificación de las parcelas CCN - 51 y ICS – 95	32
Figura 3 Registro de datos de las parcelas clon CCN-51 e ICS-95.....	33
Figura 4 Recolección de frutos maduros para el análisis de Cd en las almendras del “cacao”.....	34
Figura 5 Toma de muestras para colonización micorrízica.....	35
Figura 6 Muestreo para determinar la longitud del micelio	36
Figura 7 Toma de muestras para análisis de Cd en suelo.....	38
Figura 8 Tomas de muestra para análisis foliar.....	39
Figura 9 Recolección de mazorcas, para análisis de Cd en las almendras de “cacao”.....	40
Figura 10 Proceso de cuantificación de la colonización micorrízica en plántones de “cacao”	44
Figura 11 Proceso del muestreo para la obtención de Micelio extraradical (MER).....	46
Figura 12 Proceso para la extracción de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA).....	48
Figura 13 Prueba de Tukey para el contenido de Cd (ppm) en suelo de “cacao”	53
Figura 14 Prueba de Tukey para el contenido de Cd (ppm) en hojas de “cacao”	55
Figura 15 Prueba de Tukey para el contenido de Cd (ppm) en granos de “cacao”.....	57
Figura 16 Prueba de Tukey para la colonización micorrízica (%) en plantas de “cacao”...	59
Figura 17 Prueba de Tukey para la longitud de micelio extraradical (cm)	61
Figura 18 Prueba de Tukey para el número de esporas en suelos de “cacao”.....	63

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1: Resultados de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas de las variables Cd en hojas, suelos y granos de “cacao” de dos clones estudiados	97
Apéndice 2: Resultados de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas de los datos de micelio extraradical, colonización micorrícica y densidad de esporas en dos clones estudiados	100
Apéndice 3: Resultado de análisis de suelo – caracterización.....	103
Apéndice 4: Datos hidrometereológicos de las zonas de estudio.....	106
Apéndice 5: Análisis de suelo – cadmio (Cd)	109
Apéndice 6: Análisis foliar – cadmio (Cd).....	111
Apéndice 7: Análisis de granos – cadmio (Cd)	113

RESUMEN

Se evaluó el rol de los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) sobre la presencia de cadmio (Cd) en plantaciones de “cacao” *Theobroma cacao* Linnaeus en tres sistemas agroforestales de la región San Martín. Se inició colectando 200 g de suelo para evaluar los indicadores micorrízicos y, por otro lado, 1 500 g de suelo y 2 000 g de semilla de “cacao” (CCN-51 e ICS-95) para determinar el Cd. Se evaluó el Cd en suelos, hojas y granos con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los dos clones; verificando la correlación de las características del suelo con los HMA. Los datos fueron digitados en Excel, realizando los supuestos del Anova (normalidad de datos y homogeneidad de varianzas), se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación de medias de Tukey para identificar en que variable hubo significancia ($p < 5\%$), todos los análisis estadísticos fueron realizados por el software InfoStat. Los resultados para el Cd en el suelo, en el ICS-95 (convencional), se tuvo 0,39 ppm; comparando con el CCN-51 con 0,28 ppm (mixto), en el Cd en hojas para el CCN-51 (ecológico) se obtuvo 3,54 ppm, comparando con el ICS-95 con 1,90 ppm (ecológico) y en el Cd en granos para el CCN-51 (ecológico) se obtuvo 1,17 ppm comparado con el ICS-95 con 1,12 ppm (ecológico). La colonización no presentó diferencias significativas, obteniendo 50,55 % (mixto, CCN-51) y 65,55 % (ecológico, ICS-95); además, la mayor longitud de micelio extraradicular lo presentó el sistema convencional CCN-51 con 19,57 cm, comparando con el ICS-95 con 17,37 cm (convencional). El mejor modelo para el efecto de las variables edáficas se dio en el tamaño de micelio que fue influenciado por el pH, K y N. Concluyendo que el contenido de Cd en la planta, estuvo correlacionado con las variables micorrízicas.

Palabras Clave: CCN-51, Cd, Clon, Colonización, ICS-95, micelio, “cacao”, sistemas agroforestales.

ABSTRACT

The role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on the presence of cadmium (Cd) in *Theobroma cacao* Linnaeus “cocoa” plantations in three agroforestry systems in the San Martín region was evaluated. It began by collecting 200 g of soil to evaluate the mycorrhizal indicators and, on the other hand, 1,500 g of soil and 2,000 g of “cocoa” seed (CCN-51 and ICS-95) to determine the Cd. The Cd in soils, leaves and grains with mixed, conventional and ecological agroforestry systems in the two clones; verifying the correlation of soil characteristics with AMF. The data were entered in Excel, making the assumptions of the Anova (normality of data and homogeneity of variances), the analysis of variance (ANOVA) and the Tukey comparison of means test were carried out to identify in which variable there was significance ($p < 5\%$), all statistical analyzes were performed by InfoStat software. The results for Cd in the soil, in the ICS-95 (conventional), were 0.39 ppm; comparing with CCN-51 with 0.28 ppm (mixed), in the Cd in leaves for CCN-51 (ecological) 3.54 ppm was obtained, comparing with ICS-95 with 1.90 ppm (ecological) and In Cd in grains for CCN-51 (organic) 1.17 ppm was obtained compared to ICS-95 with 1.12 ppm (organic). Colonization did not present significant differences, obtaining 50.55% (mixed, CCN-51) and 65.55% (ecological, ICS-95); Furthermore, the greatest length of extraradicular mycelium was presented by the conventional CCN-51 system with 19.57 cm, compared to the ICS-95 with 17.37 cm (conventional). The best model for the effect of edaphic variables was in the mycelium size, which was influenced by pH, K and N. Concluding that the Cd content in the plant was correlated with the mycorrhizal variables.

Key Words: CCN-51, Cd, Clone, Colonization, ICS-95, mycelium, cocoa, agroforestry systems.

INTRODUCCIÓN

El “cacao” *Teobroma cacao* L., es considerado como uno de los cultivos agrícolas más importantes a nivel socioeconómico en toda América Latina, el Caribe y el mundo, debido a que es uno de los principales productos de exportación, ya sea como materia prima o como producto elaborado, el cual constituye la base de la economía y fuente de ingresos para la mayoría de pequeños y medianos empresarios y agricultores, consolidándose así, como una fortaleza para el incremento de la calidad de vida de la población (López *et al.*, 2020). El “cacao” es sembrado en su mayoría en asociación con árboles de sombra, aunque también existen plantaciones sembradas como monocultivo. En monocultivos los árboles de “cacao” se cultivan solos; mientras que, en los sistemas agroforestales se asocia con especies forestales y frutales (Schneider *et al.*, 2016).

En el Perú, específicamente en los departamentos de San Martín, Junín, Huánuco y Ucayali, la producción de “cacao” está asociado a los sistemas agroforestales; es decir, esta actividad es desarrollada con la presencia de árboles de sombra, como la “guaba” *Inga edulis* Martius, que es una leguminosa tropical; especies maderables de predominancia como “bolaina” *Guazuma crinita* Martius y “capirona” *Calycophyllum spruceanum* Schumann); además, de otras especies maderables y frutales de mediano y largo crecimiento (Pocomucha *et al.*, 2016). El cultivo de “cacao” presenta una fuerte influencia en las condiciones de crecimiento de otras especies forestales, donde el contenido y disponibilidad de la materia orgánica y nutrientes presentes en el suelo, están condicionadas por el tipo de manejo (convencional y ecológico); asimismo, este cultivo también puede tener un efecto significativo sobre la absorción de cadmio (Cd) que pueda estar presente en el suelo (Gattinger *et al.*, 2012; Ryan *et al.*, 2004).

El Cd es un metal no nutritivo que se encuentra de forma natural en el suelo y en los minerales; su existencia en el ecosistema, su absorción y acumulación en la cadena alimentaria convierte a este metal en un problema de salud pública. Durante la sexta reunión del comité de Contaminantes de los Alimentos realizada en el 2012, se informó sobre la presencia de Cd en el árbol de “cacao” y sus derivados; razón por la cual, este metal fue

agregado en la lista de contaminantes y tóxicos naturales presentes en los alimentos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2014). En los suelos, la solubilidad, biodisponibilidad y absorción de metales como el Cd, se encuentran influenciadas por las interacciones entre pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), precipitación, salinidad, fertilización con macro y micronutrientes, especies de cultivos y cultivares, labranza y encalado (Roberts, 2014).

En el Perú, aproximadamente el 100 % del territorio presenta un suelo no contaminado por Cd ($0,29 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); sin embargo, el contenido de este metal en las hojas y granos de “cacao”, es considerablemente alta ($0,91 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), el cual afecta aproximadamente al 31,25 % de las exportaciones, lo que económicamente representa una disminución de 131,62 millones de dólares anuales en todo el país; sin embargo, se están logrando importantes avances en tecnología a nivel agrícola para reducir la biodisponibilidad y bioacumulación de este metal en el grano de “cacao”, haciendo uso de diferentes mecanismos (orgánicas, inorgánicas y combinadas) como los sistemas agroforestales, biorremediación y selección de genotipos. Otra de las opciones radica en el desarrollo de asociaciones de plantas y micorrizas tolerantes al estrés abiótico, siendo esto una nueva estrategia prometedora para la fitorremediación y las medidas de mejora del suelo; asimismo, la acción combinada de las lombrices de tierra y los HMA mejoran de manera factible la tolerancia a los metales de las plantas hiperacumuladoras y mejora la calidad del suelo contaminado (Wang *et al.*, 2021).

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el rol de las micorrizas arbusculares sobre la presencia de cadmio en plantaciones clonales de “cacao” *Theobroma cacao* L. en tres sistemas agroforestales de San Martín, Perú.

Objetivos específicos

- Analizar el contenido de cadmio (Cd) en suelos, hojas y granos de “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS - 95 y CCN - 51 en tres provincias de la región San Martín.
- Determinar la colonización micorrízica, micelio y densidad de esporas de HMA en “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS - 95 y CCN - 51 en tres provincias de la región San Martín.
- Determinar la correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en suelos, en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS - 95 y CCN - 51 en tres provincias de la región San Martín.
- Determinar la correlación de las micorrizas arbusculares y contenido de cadmio (Cd) en hojas y granos de “cacao” en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en clones ICS - 95 y CCN - 51 en tres provincias de la región San Martín.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacionales

Yongqiang *et al.* (2021) investigaron los “Efectos de Hongos Micorrízicos Arbusculares sobre el crecimiento y la absorción de elementos tóxicos de *Phragmites australis* Steudel, bajo estrés de Zn y Cd en el Instituto de tecnología Harbin, China”, donde el objetivo fue identificar los mecanismos de transporte de oligoelementos tóxicos (OT) bajo la influencia de HMA. La investigación fue de tipo experimental con enfoque cuantitativo y cada tratamiento fue realizado por triplicado, conformado por 32 macetas rectangulares. La metodología consistió en esterilizar piezas de vermiculita de 2 mm a 121 °C durante 2 h para servir como medio de cultivo; asimismo, el rango de tolerancia de *P. australis* S. fue obtenido a través de experimentos preliminares y previos datos del grupo de investigación. Seguidamente, las plántulas en la etapa de tres hojas fueron trasplantadas en macetas de 11 cm de diámetro y 10 cm de altura, donde cada tratamiento consistió en tres macetas (dos plántulas en cada maceta) que fueron colocadas dentro de una maceta rectangular (310 mm x 235mm x 121 mm) con solución nutritiva añadida a la altura de las macetas pequeñas. A continuación, durante la etapa de cinco hojas, la solución nutritiva fue reemplazada con una solución de estrés que contenía OT, el cual fue cambiada cada tres días. Los datos fueron analizados mediante el software SPSS 23.0 y ANOVA unidireccional, seguido de la prueba LSD en un umbral de $P < 0,05$. Como resultado observaron que los HMA aliviaron los efectos tóxicos del Zn y el Cd en *P. australis* S. al aumentar la biomasa vegetal, mediante diferentes patrones reguladores bajo diferentes concentraciones de OT; asimismo, las funciones que realizaron las enzimas de superóxido dismutasa (SOD) y ascorbato peroxidasa (APX) aumentaron bajo estrés de Zn; y las actividades de SOD, catalasa (CAT), peroxidasa (POD) y APX, aumentaron significativamente a altas concentraciones de Cd. Los HMA presentaron diferencias en sus estrategias al regular el transporte de diferentes metales bajo estrés OT; bajo estrés de Zn, la concentración de este en *P. australis* S., disminuyó entre un 10 y un 57

%; y bajo estrés por cadmio, la concentración aumentó hasta un 17- 40 %. En ausencia de HMA, la exposición al Cd disminuyó las concentraciones de Zn en *P. australis* S. a 100 mg/L y 300 mg/L, mientras que el contenido de Zn incrementó a 700 mg/L; sin embargo, independientemente de la concentración de Cd, la adición de Zn disminuyó la concentración de Cd en ambos tratamientos tanto en presencia como en ausencia de HMA. Concluyeron que los hallazgos del estudio son importantes para aplicar HMA a plantas de *P. australis* S. en la fitorremediación de ecosistemas contaminados con Zn y Cd.

Araujo *et al.* (2019) desarrollaron una investigación sobre la “Diversidad de Hongos Micorrízicos Arbusculares en Agroforestería, plantaciones convencionales y bosques nativos en el Estado de Roraima, Norte de Brasil”, donde el objetivo fue evaluar la influencia de diferentes sistemas de uso y manejo de la tierra en la diversidad de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA). La investigación fue de tipo experimental con un enfoque cuantitativo, donde utilizaron un diseño completo al azar (DCA). La metodología consistió en la recolección de muestras guiada por el protocolo de muestreo de Nicolodi, donde recolectaron cuatro muestras de suelo de diferentes usos: sistema agroforestal, siembra convencional de soya y maíz, y bosque nativo (parcelas de 10 x 10 m); seguidamente las muestras de suelo fueron puestas a dos formas de fertilización y corrección, donde para ambas plantaciones utilizaron 1500 kg de caliza dolomítica, 100 kg de cloruro de potasio, 500 kg de superfosfato triple y 50 kg de FTE (micronutrientes); posteriormente, las muestras fueron puestas en bolsas plásticas y almacenadas bajo refrigeración a 4 °C hasta su procesamiento; asimismo, una parte del suelo fue destinado para los análisis químicos y extracción de esporas. Luego de 150 días de incubación en invernadero, extrajeron las esporas mediante un proceso de decantación por tamizado húmedo con 1 000 g de suelo, en placas esterilizadas, para evaluar HMA, volumen e identificación taxonómica. El análisis de diversidad en los diferentes sistemas fue realizado mediante el índice de Shannon; asimismo, para la similitud de HMA entre diferentes usos de suelos utilizaron el índice de Bray-Curtis y el método de Ward (construcción del dendograma de similitud); además, desarrollaron los análisis estadísticos con el software R Core Team (2018). Los resultados mostraron 16 especies de HMA y el género *Acaulospora* fue el más frecuente, seguido del género *Glomus*; asimismo, el suelo bajo sistema agroforestal presentó una mayor riqueza de especies, mientras que el bosque nativo fue la que menor cantidad presentó; por otro lado, las áreas de soya y maíz presentaron mayores valores de densidad que el sistema agroforestal y el bosque nativo; además, en el

sistema agroforestal los atributos de la materia orgánica del suelo (MOS), Al^{3+} y $H + Al$, influyeron en la riqueza de especies de HMA. Por lo tanto, concluyeron que los suelos agroforestales resultaron ser una alternativa sostenible que influyó en la composición de las comunidades de HMA en estos ecosistemas.

Rodríguez (2017) en la investigación “Dinámica del cadmio (Cd) en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca”, tuvo como objetivo identificar la variabilidad espacial del Cd en suelo y almendra a fin de evaluar sitios con niveles altos, en una zona productora de “cacao” en el centro de Colombia. La investigación fue de tipo no experimental con enfoque descriptivo – explicativo. La metodología consistió en seleccionar y muestrear 64 fincas en Yacopí y 41 fincas en Nilo, en los cuales realizó una caracterización de los niveles de Cd en suelo y tejido vegetal de “cacao”, siguiendo una metodología observacional, ajustada a un análisis exploratorio, donde la unidad experimental correspondió a un árbol con frutos maduros por finca; asimismo, alrededor de cada planta tomó una muestra de suelos compuesta, conformada por submuestras a una profundidad de 0 a 25 cm y una distancia de 35 cm del tallo; seguidamente, del mismo árbol de “cacao” tomó hojas y frutos maduros de la parte central de las ramas (200 g/planta). Para el análisis de datos exploratorio, estas fueron llevadas a cabo mediante métodos estadísticos descriptivos; además, los análisis de datos fueron desarrolladas en el programa R studio Versión 1.1.383. Los resultados determinaron que en Yacopi, los mayores contenidos de Cd fueron dadas en la fase asociada a la materia orgánica y carbonatos, donde alcanzó el 33,14 y 42,27 % del Cd total; además, los contenidos de Cd en fragmentos rocosos variaron de 0,9 a 26,7 mg/kg. En el Nilo, los contenidos más altos de Cd también fueron observadas en la fase de materia orgánica, alcanzando niveles de 0,42 mg/kg en una de sus fincas estudiadas equivalente al 60 - 75 % del total de Cd encontrado en el suelo, y las muestras de fragmentos rocosos arrojaron resultados que oscilaron de 0,3 mg/kg; además, la correlación entre Cd en almendra y los contenidos de Cd en los óxidos de magnesio que representaron entre 12,2 a 18,2 %, fue alta (0,65); asimismo, la relación entre carbonatos y MO resultó ser baja para los suelos del Nilo. En la profundidad ponderada encontraron una clara relación entre el Cd en las almendras de “cacao” y las variables explicativas consideradas. Los niveles de Cd totales y disponibles medidos entre 60 y 100 cm de profundidad, mostraron una tendencia a ser más bajos que en profundidades entre 0 cm y 30 cm (desde el punto de vista de la estadística descriptiva). La investigación concluyó

en que, más del 90 % del Cd estuvieron distribuidas en las formas fáciles y moderadamente disponibles; asimismo, la tendencia de concentraciones más altas de Cd en el nivel superior del suelo, estuvieron asociadas a la presencia de carbonatos.

Gramlich *et al.* (2016) realizaron una investigación sobre “Absorción de cadmio (Cd) por árboles de “cacao” en sistemas agroforestales y de monocultivo bajo manejo convencional y orgánico, región del Alto Beni, Bolivia”, donde el objetivo de investigación fue comparar las concentraciones de Cd en hojas, cascaras de vainas y granos de dos cultivares de “cacao” diferentes, en cuatro sistemas de producción. La investigación fue de tipo no experimental con un enfoque mixto. Aplicaron un diseño estadístico de bloques aleatorios con 4 bloques repetidos, cada uno de los cuales constó de 5 parcelas del sistema de producción. La metodología consistió en muestrear cuatro combinaciones de dos sistemas de cultivo agroforestal y monocultivo, con los dos tipos de manejo orgánico y convencional; es decir, cuatro sistemas de producción: monocultivo convencional, monocultivo orgánico, agroforestal convencional y orgánica agroforestal. Seguidamente, recolectaron muestras de hojas (10 unidades), frutos (1 a 3 unidades) y raíces de dos cultivares de cada sistema de producción, junto con muestras de suelo recolectadas alrededor de estos árboles a una distancia de 70 cm alrededor del tronco, donde para cada uno, la circunferencia fue medida a 10 cm del suelo; posteriormente, analizaron muestras de hojas, vainas y granos para determinar el cadmio (Cd), hierro (Fe) y zinc (Zn); asimismo, analizaron las raíces para diagnosticar la abundancia de micorrizas y; finalmente, analizaron las muestras de suelo para determinar el Cd, Fe y Zn total y disponible, así como también, el Cd, DGT, Cd y Zn, pH, materia orgánica, textura, fósforo (P) y potasio (K) disponible. Los análisis estadísticos fueron evaluados mediante Tukey y ANOVA de una vía para las diferencias en los factores del suelo entre los sistemas de producción y dos vías para comprobar los efectos del sistema de producción y del cultivo sobre el Cd, el Fe y el Zn de la planta. Los resultados mostraron que no hubo relevancia significativa en los sistemas de producción de los dos cultivares, sobre la concentración de Cd en las hojas; sin embargo, los contenidos foliares de Cd en los sistemas agroforestales fueron muy bajas en comparación con el sistema de monocultivo, lo que explicó el 60 % de la varianza de las concentraciones de Cd en las hojas. La investigación concluyó que, las características genotípicas de los cultivares disminuyeron la tasa de absorción del Cd en los diferentes estados fenológicos de las plantas, lo que explicó que los

efectos de la variedad estuvieron determinados por la capacidad de absorción y por un efecto de crecimiento.

Chávez *et al.* (2015) realizaron un estudio sobre la “Concentración de cadmio (Cd) en granos de “cacao” y su relación con el Cd en el suelo en el Sur de Ecuador”, donde tuvieron como objetivos: a) investigar el estado de Cd en suelos de fincas representativas de “cacao” en Ecuador y su relación con propiedades del suelo, y b) determinar la distribución de Cd en diferentes partes de los árboles de “cacao” (granos, hojas y cáscara). La investigación fue de tipo no experimental, con un alcance descriptivo. La metodología consistió en la recolección de muestras de suelo y plantas de 19 fincas de “cacao” representativas para estudiar la distribución de Cd a lo largo de un perfil de suelo; seguidamente, tomaron muestras a cuatro profundidades: 0–5, 5–15, 15–30 y 30–50 cm, donde dibujaron cuatro núcleos equidistantes dentro de una distancia de 100 m. Estos puntos de muestreo fueron combinados para hacer muestras compuestas de suelo con respecto a cada profundidad y sitio; asimismo, estas fueron secadas al aire, molidas y pasadas por un tamiz de 2 mm antes del análisis. Posteriormente, recolectaron muestras de plantas (hojas, granos de “cacao” y cáscaras), los cuales fueron puestas en hipoclorito al 1 % y secadas a 70 °C durante 72 horas. Para determinar la disponibilidad de Cd en los suelos y la fuente de contaminación en las áreas de cultivo de “cacao”, analizaron muestras de perfil de suelo para Cd total recuperable y extraíble. Los datos fueron analizados mediante el programa JMP® versión 8.0.2, donde para la evaluación de la distribución del Cd utilizaron un análisis de varianza (ANOVA) de una vía; además, de una correlación por pares y regresión simple con una significancia estadística en $PAG \leq 0,05$. Los resultados determinaron que las propiedades del suelo y las concentraciones de Cd difirieron para todas las profundidades, donde el Cd total recuperable varió de 0,88 a 2,45 mg.kg⁻¹ y de 0,06 a 2,59 mg.kg⁻¹, con un promedio de 1,54 y 0,85 mg.kg⁻¹ respectivamente; mientras que, para el Cd extraíble con M3, los valores fueron de 0,08 a 1,27 y de 0,02 a 0,33 con valores medios de 0,40 y 0,10 mg.kg⁻¹; asimismo, observaron una tendencia decreciente en el promedio en los sitios de muestreo, donde el Cd recuperable total disminuyó en un 42 %, mientras que el Cd extraíble en M3 disminuyó en un 78 % desde la capa superficial hasta la subsuperficial del suelo. La concentración de Cd en las hojas estuvo mayormente por debajo del límite de detección del método 0,1 µg.L⁻¹, y las concentraciones de Cd en los granos de “cacao” oscilaron entre 0,02 y 3,0 mg.kg⁻¹, con un valor medio de 0,94 mg.kg⁻¹; además, detectaron Cd en las cáscaras solo cuando la concentración de Cd en

los frijoles fue de 1 mg.kg^{-1} . Concluyeron que, el Cd fue acumulado sustancialmente en los suelos superficiales (0-15 cm) bajo la producción de “cacao” en el sur de Ecuador, esto debido a las actividades antropogénicas, donde la contaminación del suelo con Cd resultó en la acumulación de Cd en el grano de “cacao”.

1.1.2. Nacional

Mendoza *et al.* (2021) desarrollaron una investigación sobre el “Cadmio (Cd) en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en la región de San Martín (Lamas), Perú”, donde el objetivo fue determinar la concentración de Cd en plantaciones de *T. cacao* ubicadas en San Martín (Lamas). La investigación fue de tipo no experimental, donde utilizaron un diseño completamente al Azar (DCA) para la selección de fincas cacaoteras. La metodología consistió en tomar muestras de suelo a una profundidad de 10 cm; asimismo, realizaron colectas de hojas y granos de fincas cacaoteras, ubicadas entre los 400, 600 y 800 m s.n.m; posteriormente, las muestras colectadas de hojas, granos y suelo fueron llevadas al laboratorio para los análisis de Cd existentes, mediante el método de digestión ácida EPA-3050B ($\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2$) y Espectrofotometría de Absorción Atómica. Además, determinaron la textura (Hidrómetro), cálculo de pH (potenciómetro), conductividad eléctrica (conductímetro), cálculo de fósforo disponible (Método Olsen modificado), potasio y sodio (Espectroscopia de absorción atómica), materia orgánica (Método Walkley -black), calcio y magnesio (Espectroscopia de absorción atómica). Para el análisis estadístico emplearon un diseño descriptivo, donde los datos fueron analizados con el software libre R Studio versión 4.0.3., empleándose la prueba estadística t student, prueba *Post hoc* de Games-Howell y ANOVA de Welch. Los resultados determinaron que existió concentraciones elevadas de Cd en los granos, hojas y suelo, donde los niveles superaron los 0,5 ppm (Límite Máximo Permisible) permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), debido a que el Cd presentó una posibilidad de translocarse y movilizarse llegando a diferentes órganos. Por otro lado, los resultados del pH obtenido, oscilaron entre 6,15 – 6,23, con una concentración de Cd que superó los LMP; sin embargo, en los distritos de Huicungo y San Martín (región San Martín) las concentraciones de Cd alcanzaron los 2,09 ppm, demostrando que la presencia y disponibilidad del Cd en suelos estuvo favorecida por tener un pH ácido; además, en cuanto al análisis de los suelos, identificaron diferentes concentraciones de N (0,13 – 0,19 %), P (4,89 – 6,02 ppm) y K (115 - 178 ppm). La

investigación concluyó que, la concentración de Cd en plantaciones de “cacao” en la región San Martín (Lamas) ubicadas entre los 600 y 800 m s.n.m., superaron los límites máximos permisibles indicados por la OMS; por lo que urge implementar en esta zona, estrategias tendientes a limitar la concentración de Cd en este cultivo.

Florida (2021) desarrolló un artículo de investigación sobre “Cadmio (Cd) en suelos y granos de “cacao” de Perú y origen sudamericano”, donde el principal objetivo fue evaluar mediante la interpolación de datos, la presencia de Cd disponible en el suelo, su bioacumulación en el grano de “cacao” y los avances tecnológicos para su control; así como, analizar los efectos potenciales sobre los volúmenes de exportación de América Latina, utilizando al Perú como caso de análisis. Para determinar el Cd disponible en el suelo de algunos países productores de “cacao” de América del Sur, empleó 17 referencias; asimismo, para el Cd total en granos de “cacao” de algunos países productores de América del Sur empleó 11 referencias. Los resultados determinaron que un promedio de $0,40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Cd disponible se encuentra en el suelo de los países productores de “cacao” de América del Sur, lo cual lo clasifica como un suelo libre de contaminación por Cd, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), quien estableció un valor crítico de $0,43 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. En el caso de Perú, el 100 % del territorio presentó un suelo no contaminado por Cd ($0,29 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); sin embargo, obtuvo altos niveles de este metal en los granos de “cacao” ($0,91 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), que afectó aproximadamente al 31,25 % de las exportaciones, lo que representó una disminución de 131,62 millones de dólares anuales; asimismo, determinó que en América Latina, el país de Ecuador presentó un suelo con los niveles más altos en Cd, y los países con los promedios más altos de este metal en los granos de “cacao”, fueron Ecuador y Venezuela. La investigación concluyó que, el Cd presentó la propiedad de bioacumularse en diferentes partes de la planta de “cacao”; en tal sentido, el autor recomendó la orientación de las exportaciones a mercados que no tienen límites para este metal, como una alternativa a corto plazo; además, de lograr avances significativos en tecnología para la reducción de la biodisponibilidad y bioacumulación del Cd en el grano de “cacao”, mediante la aplicación de enmiendas (orgánicas, inorgánicas y combinadas), sistemas agroforestales, biorremediación y selección de genotipos.

Rosales *et al.* (2020) ejecutaron la investigación “Estudio para determinar niveles de metales pesados en cultivos de “cacao” aplicado en zonas interiores del Perú, donde tuvieron como objetivo relacionar la intensidad del uso insostenible de la tierra con las concentraciones de Cd en suelo, hojas y granos, en las áreas de estudio ubicadas en el Perú; así como, el campo corredor Verde-Honoría-Tournavista (Región Ucayali y Región Huánuco). La investigación fue de tipo no experimental, con un enfoque cualitativo y un alcance descriptivo. La metodología consistió primero en el reconocimiento y delimitación del área de estudio para la captura de imágenes y mapeo del lugar; seguidamente, procedieron a la recolección de muestras representativas de suelo (excavación en forma de V entre 30 a 50 cm de profundidad), grano de “cacao” y hojas (árboles dentro del área seleccionada), donde utilizaron el método de cuadrícula regular; posteriormente, las muestras fueron puestas en bolsas Ziploc, debidamente identificadas y enviadas para los análisis químicos correspondientes, al laboratorio de análisis FIGMM-UNI, ubicado en Lima – Perú; además, para la obtención de las concentraciones de metales pesados en los suelos y hojas, utilizaron un espectrofotómetro de absorción atómica. El análisis y procesamiento estadístico de los datos obtenidos fue realizado utilizando el software R; asimismo, para la digitalización de los mapas geoquímicos, utilizaron el software ArcGis. Los resultados confirmaron que existió una distribución del Cd por todos los tejidos de las plantas de “cacao” y en los suelos de las plantaciones, tanto a nivel de unidad productiva y a nivel de variedad, donde aproximadamente entre el 70 y 80 % del Cd fue retenido en las raíces y el resto fue trasladado a otras partes de los tejidos; asimismo, determinaron que, para el grano de “cacao”, la concentración promedio de Cd fue de $0,96 \text{ mg.kg}^{-1}$, cuyo valor estuvo por encima de los estándares internacionales de la Unión Europea, quien estableció una concentración máxima de $0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$. Respecto a las muestras de suelos, la concentración media de Cd fue de $1,63 \text{ mg.kg}^{-1}$, el cual también superó los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), cuyo valor debió estar por debajo de los $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$. La investigación concluyó que, los niveles de Cd presente en los tejidos de las plantas de cacao y en los suelos de las plantaciones de Campo Verde – Honoría Tournavista, superaron los límites máximos permisibles (LMP), por lo que los autores recomendaron el desarrollo de investigaciones encaminadas a proponer medidas que permitan remediar la situación en el área de estudio, así como, la realización de estudios para abordar la movilidad del Cd y evitar la absorción de Cd en el árbol del “cacao”.

Florida *et al.* (2019) desarrollaron una investigación sobre el “Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio (Cd) en suelo y almendra de cacao”, donde tuvieron como objetivo evaluar el efecto del compost y NPK en diferentes grupos microbianos del suelo, y el Cd disponible en suelos y almendras de “cacao” CCN-51 *Theobroma cacao* L., localizados en Nuevo Progreso, región Ucayali. La investigación fue de tipo experimental, con enfoque cuantitativo, donde utilizaron un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), conformado por cuatro tratamientos, más cuatro repeticiones. La metodología consistió en aplicar diferentes cantidades de compost y NPK según cada tratamiento: T1 (testigo)= 0; T2= Compost a dosis de 3 000 kg.ha⁻¹; T3= NPK (84-35-161) y T4= Compost a dosis de 1 500 kg.ha⁻¹ + NPK (42-18-80). La técnica de evaluación consistió en un recuento en placa con diluciones seriadas para la población de bacterias fijadoras de nitrógeno, fungi, aerobios viables y actinomicetos; asimismo, para el Cd disponible utilizó el anticoagulante EDTA al 0,05 M; además, para los granos de “cacao” utilizó el método de digestión ácida, utilizando Nítrico Perclórico 4:1. Los datos obtenidos fueron sometidos a la prueba de normalidad de Shapiro – Wilk y Shapiro-Francia a una distribución normal al 5 %; posteriormente, realizaron un análisis de varianza (ANOVA) y correlación entre los tratamientos, utilizando los programas IBM SPSS 25 y Stata 15. Los resultados indicaron que la población media de los diferentes grupos microbianos evaluados, fueron equivalentes a una población de bacterias aeróbicas viables de 10⁴ UFC.g⁻¹, la población de actinomicetos estuvo en un rango de 10⁴ a 10⁵ UFC.g⁻¹, y los fungi y bacterias fijadoras de nitrógeno presentaron una media de 10³ UFC.g⁻¹; donde, en ninguno del caso de las variables microbiológicas hubo diferencias significativas (p< 0,05). Asimismo, el contenido de Cd en el suelo fue variable, donde los valores alcanzados fueron de 0,17 a 0,25 µg.g⁻¹; para la presencia de Cd en los granos de “cacao”, los valores oscilaron de 0,31 a 0,43 µg.g⁻¹, encontrándose diferencias significativas para la variable de este metal en las almendras (p> 0,05). Además, las pruebas estadísticas determinaron que no hubo diferencia para los tratamientos y grupos microbianos, a excepción del Cd en las almendras del “cacao”. En conclusión, establecieron que el compost (en T2 y T4) presentó un potencial para minimizar el cadmio en los granos de “cacao”.

Arévalo *et al.* (2016) desarrollaron una investigación sobre “Metales pesados en suelos de plantaciones de “cacao” (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú”, donde el objetivo principal fue determinar los contenidos totales de metales pesados (Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, etc.)

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) en árboles de “cacao” entre 10 y 15 años. La investigación fue de tipo no experimental, con un enfoque mixto. La metodología consistió en seleccionar 70 plantaciones de “cacao”; seguidamente, tomaron muestras de suelo a 6 diferentes profundidades (0-5 cm; 5-10 cm; 10-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm y 60-80 cm), donde cada muestra estuvo conformada por 1 kg de mezcla de suelos distribuidas en forma de zigzag; posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio analítico de plantas y suelos del Instituto de Cultivos Tropicales – ICT, Tarapoto, Perú, donde realizaron la determinación de la propiedades físicas (textura) y químicas (pH, conductividad eléctrica, iones, materia orgánica, CIC, etc.). El análisis estadístico de los datos fue realizado usando el software Infostat versión 2014; asimismo, las propiedades físico químicas de los suelos por departamento, provincias y profundidades, fueron comparadas por medio del ANOVA y las medias comparadas por la prueba de Scott & Knott ($p < 0,05$). Los resultados determinaron que los valores de metales pesados obtenidos, estuvieron por debajo del nivel fitotóxico, donde el promedio de hierro (Fe) fue mayor en la Región sur ($4,28 \times 10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), seguido de la Región norte ($2,57 \times 10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); para el cobre (Cu) encontraron valores promedios mayores en la Región norte y sur ($37,54$ y $34,46 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), seguido de la Zona central ($17,7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), para el zinc (Zn) obtuvieron valores promedios mayores en la Zona sur ($96,83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), seguido de la Zona norte ($74,35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y la Zona central ($49,97 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); asimismo, los valores de magnesio (Mg) oscilaron entre $82,63 \pm 19,89 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y $1\ 275,20 \pm 4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; para el cadmio (Cd), los valores promedios fueron mayores en la Zona norte ($0,20 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), seguido de la Zona central ($0,08 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y la Zona sur ($0,00 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); para el plomo (Pb), los valores promedios fueron mayores en la Zona sur ($21,81 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), seguido de la zona norte ($11,20 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y Zona centro ($8,66 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Además, la correlación de variables como pH, % de arcilla y Mg fue positiva con los metales pesados. La investigación concluyó que, el Cd tuvo una correlación positiva con la materia orgánica, pH, P, K, CIC, Cd^{+2} , Mg^{+2} y K^{+} y de forma negativa con la acidez, excepto con el Pb; asimismo, los metales restantes correlacionaron de forma positiva con la CIC y de forma negativa con la acidez intercambiable.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Origen del “cacao”

El “cacao” es una especie vegetal antiguo cuyo origen es americano, de acuerdo con los estudios de Pound, Cheesman, el “cacao” es originario de América del Sur, en el área de Alto Amazonas que comprende países como Ecuador, Colombia, Perú y Brasil, es ahí donde encontraron mayor variabilidad de la especie. Sin embargo, hay otros centros muy importantes de dispersión de la especie y que han dejado un papel sobresaliente en el cultivo de “cacao”, la calidad del material originalmente encontrado por los españoles en México, en esta zona encuentran los materiales criollos, pues ha sido la principal fuente de material de mejoramiento para la mayoría de las áreas donde hoy en día se produce “cacao” de calidad (Gustavo, 1985). Además, existen poblaciones de tipo silvestre y nativa en la región central y sur del Amazonas (García, 2014).

1.2.2. “Cacao” en el Perú

En el Perú existen diversos tipos de “cacao”, algunos aromáticos y otros no, esto es debido a las propiedades organolépticas del genotipo; asimismo, gracias a las capacitaciones que brindan las cooperativas, asociaciones y el Estado, el Perú ocupa el segundo puesto en la producción de “cacao” orgánico (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2012).

Perú es el país que muestra los mejores esfuerzos de producción y productividad del continente, consolidando su papel como exportador de “cacaos certificados” (orgánico y comercio justo), el cual se proyecta un importante crecimiento de su producción cacaotera y estima duplicar su productividad por hectárea en el mediano plazo, a partir de nuevas plantaciones; además, en el Perú el “cacao” es cultivado principalmente en la parte baja de la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, con presencia en gran parte de las zonas tropicales, entre los 200 y 900 m s.n.m. (Arévalo *et al.*, 2017).

Oblitas (2015) indicó que, por medio del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), en el año 2014 se llegó a obtener un total de 76 900 toneladas en cuanto a la producción

nacional, cuya superficie fue de 100 000 ha., generando 7,5 millones de jornales y 111 millones de dólares de ingresos, favoreciendo directamente a 90 mil familias cacaoteras de manera directa y 450 mil familias indirectamente. El desarrollo de este cultivo fue convirtiéndose en uno de las principales actividades agrícolas más importantes, siendo así que, en el año 2012, el MINAGRI lo declaró como Patrimonio Natural de la Nación y se instauró el Registro Nacional de Cultivares de Cacao Peruano (RNCCP) (MINAGRI, 2012).

1.2.3. Fenología del cultivo de “cacao”

Yzarra y López (2017) mencionan que el cultivo de “cacao” tiene cuatro fases bien diferenciadas durante su crecimiento y desarrollo, los cuales se detallan a continuación:

- **Botón floral:** Se emiten nuevos brotes, yemas en las ramas principales y secundarias de la planta; estos tienen el tamaño aproximado de 1 cm.
- **Floración:** Una vez emitidos los botones florales, estos se abren y permanecen abiertas por un corto tiempo (24 horas).
- **Fructificación:** Durante el proceso de fertilización o polinización, el polen llega al estigma, un tubo crece abajo del estilo y entra al ovario. El polen viaja a través del tubo y se juntan con el óvulo, fertilizándolo. El óvulo fertilizado se convierte en semilla, y el ovario se convierte en fruta. Polinizado la flor empieza el crecimiento del fruto u mazorca; esta fase empieza cuando la longitud del fruto es de 2 cm, los frutos maduran mayormente en la primavera y el verano.
- **Maduración:** Luego de la fructificación, el fruto se desarrolla hasta su máximo tamaño, mostrándose de diferentes formas y colores, dependiendo del clon o genotipo a usarse.

1.2.4. Variedades de “cacao”

El Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI] (2016), menciona que 24 especies forman parte del género *Theobroma cacao* L., y se clasifican botánicamente en tres tipos, los cuales se detallan a continuación:

- **Criollo:** Es la primera variedad que introdujeron los colonizadores en Europa; este “cacao” se cultiva mayormente en Guatemala, México y Nicaragua (pequeñas extensiones); además, países como Perú, Venezuela, Colombia, Trinidad, Jamaica e islas del Caribe, también desarrollan esta actividad. Durán, (2012) indica que solo el 5 a 8 % representa la producción mundial.
- **Forastero:** Este “cacao” es procedente de la Alta Amazonía, nativo para Brasil, Colombia, Perú y Bolivia y se cultiva de forma principal en Perú; sin embargo, fue introducido a Europa mediante los colonizadores; además, África y Asia lo producen en mayor cantidad; asimismo, el 80 a 85 % de la producción mundial está representada por las regiones de África Occidental y Sudeste Asiático. Este tipo presenta propiedades fitosanitarias muy buenas por ser resistente a plagas y enfermedades.
- **Trinitario:** Es el resultado de cruzamiento entre dos variedades de “cacao” (Criollo y Forastero) y su origen radica en la Isla Trinidad, donde existen plantas en estado silvestre; asimismo, este se expandió al Caribe y América Latina. Este tipo de “cacao” presenta propiedades organolépticas óptimas por el gran valor aromático; al mismo tiempo, esta variedad presenta resistencia a plagas y enfermedades. Morales *et al.* (2015) manifiestan que esta variedad en la producción mundial representa solo el 10 % al 15 %. Existen muchos clones que se cultivan en San Martín, pero entre los más representativos son el ICS-95 y CCN-51. A continuación, García (2014) describe las características principales de estos clones:
 - **ICS-95:** El genotipo al que pertenece es Trinitario, el tamaño de su fruto es grande, posee 44 semillas por fruto y el índice de mazorca es 23, con un rendimiento de 1 501 kg/ha; asimismo, es autocompatible, susceptible a pudrición parda, moderadamente resistente a escoba de bruja y moderadamente susceptible a moniliasis.
 - **CCN-51:** Es el resultado del cruzamiento de tres genotipos (IMC-67, ICS-95 y Forastero desconocido), su fruto es muy grande, el número de semillas es 44 y el número de mazorca por planta es 16, con un rendimiento aproximado de 2 760 kg/ha; asimismo, es autocompatible, presenta susceptibilidad para la enfermedad de pudrición parda, moderada resistencia para escoba de bruja y moderada susceptibilidad para moniliasis.

1.2.5. Sistemas agroforestales asociados al “cacao”

Las asociaciones forestales con el cultivo de “cacao” promueven muchos beneficios a comparación de un monocultivo, ya que se aprovecha el área que se tiene para producir y asociar “cacao” con otras especies vegetales como maíz, frijol, yuca, plátano, para que en los primeros años del “cacao” se tenga ingreso económico con estos cultivos anuales. La producción de estos cultivos está garantizada, al mismo tiempo mejora la calidad de vida del agricultor (Navarro y Mendoza, 2006)

Por otro lado, estos sistemas agroforestales disminuyen el efecto invernadero por la absorción de dióxido de carbono (Waheed *et al.*, 2018), ayuda a maximizar y sostener la diversidad de los bosques protegiendo y conservando la flora y fauna que están en riesgo de desaparición, ocasionado por el factor antrópico (Abada *et al.*, 2016). Asimismo, incrementa la fauna microbiana de los suelos mejorando la absorción de nutrientes y agua, mejora la estructura de los suelos (Singh *et al.*, 2014), y da lugar a la formación de otras especies vegetales (Cline y Zak, 2015).

- **Agricultura convencional:** La agricultura convencional incluye una gran cantidad de fertilizantes químicos y pesticidas para aumentar el rendimiento por hectárea (Lori *et al.*, 2017). El cambio de uso de la tierra está impulsado en parte por la intensificación agrícola mundial cuyo objetivo es satisfacer las demandas de una población humana en crecimiento, pero provoca una grave degradación de los suelos cultivables (Smith *et al.*, 2019). Los componentes clave de la intensificación agrícola son el uso cada vez mayor de fertilizantes sintéticos y pesticidas químicos con consecuencias negativas bien conocidas para la biota del suelo (Geisen *et al.*, 2019).
- **Sistema productivo ecológico:** Es un descriptor amplio de los métodos agrícolas que buscan ser más sostenibles que la agricultura convencional evitando consecuencias naturales y sociales negativas no deseadas. En reacción al enfoque implícito de la agricultura convencional en el período actual, la agricultura ecológica adopta una visión a largo plazo. Al utilizar los activos de una manera que no los agote, la agricultura ecológica tiene como objetivo mantener la productividad y la utilidad para la sociedad a perpetuidad (Rigby y Caceres, 2001).

La agricultura ecológica incluye muchos sistemas y técnicas, todos ellos implicando la reducción o eliminación de insumos inorgánicos. En lugar de fertilizantes y pesticidas químicos, la agricultura ecológica utiliza procesos naturales y recursos disponibles localmente para gestionar los campos de cultivo. Las técnicas son generalmente muy diversas y específicas del contexto y pueden incluir: diques de tierra y piedras, terrazas y labranza mínima para la conservación del suelo; cultivos de cobertura, cobertura de mantillo y rotación de cultivos para la fertilidad del suelo; cuencas de plantación, presas de control, estanques, tanques, pozos, sistemas de secano y riego por goteo para la recolección y distribución de agua; y cultivos intercalados y setos para el manejo de plagas y malezas (Shiferaw, *et al.*, 2009).

- **Sistema productivo mixto:** Bolívar (2011), sostiene que este tipo de agricultura está asociada a la agricultura tipo intensiva y busca constantemente un aumento de la productividad mediante la aplicación de las innovaciones tecnológicas más recientes; se da en él la especialización en la producción de determinados rubros, de acuerdo a la demanda de los mercados nacionales e internacionales, utiliza mano de obra asalariada; y aprovecha de manera más racional los recursos naturales, mediante el empleo de tecnologías más avanzadas, tales como los sistemas de riego y de almacenamiento del agua. Además, Pinedo (2018), en su investigación “Sostenibilidad de sistemas de producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en agroecosistemas del distrito Chiara, Ayacucho”, trabajó con sistemas de producción orgánica, mixto y convencional, en donde, generaron mayores ingresos al agricultor.

1.2.6. Condiciones edafoclimáticas para el crecimiento del “cacao”

Las condiciones de suelo y clima para un óptimo crecimiento del “cacao” son los siguientes:

- **Temperatura:** Requiere de climas propiamente cálidos y con mucha lluvia, ya que es un factor importante porque está relacionado directamente con la floración y fructificación (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2004). Asimismo, su temperatura es variable y está entre los 24 y 32 °C (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2006).

- **Precipitación:** La sensibilidad de la planta del “cacao” hacia el agua es muy notoria, mostrando un estrés por el déficit hídrico y también por mucha agua contenido en el suelo. Su requerimiento al año es de 1 500 mm hasta 2 500 mm para zonas cálidas y en zonas frescas.
- **Humedad relativa:** El “cacao” es una planta xerófila, por tanto, se afecta mucho si se presentan períodos secos prolongados y de humedad relativa baja; sin embargo, si esta última es mayor, afecta a la planta de “cacao” debido al ataque de plagas (mosquilla del “cacao”) y enfermedades (moniliasis y escoba de bruja). La humedad relativa óptima para el crecimiento y desarrollo del “cacao” es de 70 a 90 % (IICA, 2006).
- **Altitud.** Es un factor no muy determinante como el factor clima y suelo; sin embargo, el “cacao” crece mucho mejor en zonas del trópico, en rangos entre 250 a 900 m s.n.m.; no obstante, cerca de las latitudes del ecuador, el “cacao” crece entre los 1 000 m s.n.m. a 1 400 m s.n.m. (MINAGRI, 2004).
- **Viento.** Está relacionado con las defoliaciones, esto sucede cuando la velocidad del viento es fuerte (4 m/s); sin embargo, cuando la velocidad es de 1 a 2 m/s, no se presencia dicha defoliación (MINAGRI, 2004).
- **Radiación solar.** La intensidad de las horas luz sobre la planta de “cacao” tiene efectos directos en la producción, desarrollo, crecimiento y calidad de grano, debido a que la radiación incide sobre la fotosíntesis, apertura de estomas, división de células, maduración de frutos y floración. Algunos autores recomiendan el uso de un sistema agroforestal con el cultivo de “cacao” cuando está en sus primeros inicios porque necesita de sombra para un buen crecimiento y producción. (IICA, 2006).
- **Suelo.** El “cacao” crece mejor en suelos aluviales y con textura franca profundo, por lo que no se recomienda instalar en suelos de textura arenosa. Se requiere estas características físicas porque está relacionado con el sistema radicular de la planta, cuya longitud llega de 1,5 m a más. En términos de drenaje, esto tiene relación con la textura del suelo, topografía de la zona, precipitación; es decir, tiene que estar en equilibrio, si es mucha agua en el suelo las raíces empezarán a estresarse, mostrando raíces de color rojo; asimismo, en las características químicas el pH que requiere el “cacao” es

variables, ya que se desarrolla en suelos ácidos y alcalino; sin embargo, el intervalo que estará comprendido los elementos es entre 6 y 7, no obstante, el pH óptimo oscila entre 5,5 a 7,5 (MINAGRI, 2004).

1.2.7. Efectos del cadmio (Cd) en plantas

El Cd es un metal pesado, elemento muy tóxico e inhibitorios de los procesos fisiológicos de las plantas, los cuales producen síntomas característicos en las hojas, como la clorosis, reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, transpiración y el contenido de clorofila, provoca enrollamiento, desequilibrios nutricionales y modifica la actividad de enzimas en las plantas; asimismo, la deficiencia de fósforo y el transporte lento del manganeso en la planta, también produce clorosis, el cual es causado cuando este elemento sustituye al hierro o magnesio en la molécula de clorofila, afectando la biosíntesis de clorofilas (Mysliwa *et al.*, 2004).

Cuando el Cd está dentro de la planta, el metabolismo es alterado produciendo estrés oxidativo, ya que rompe los puentes de disulfuro, provocando que las proteínas se desnaturalicen; además, el Cd provoca la inhibición en el desarrollo de actividades de las metaloenzimas, debido al intercambio de metales que son parecidos a su estructura (Zn y Mg). El Mg está dentro de la enzima Rubisco, si se intercambia con Cd destruye la enzima en subunidades y el ciclo de Calvin se verá afectado gravemente (Sandalió *et al.*, 2001).

1.2.8. Relación suelo y cadmio (Cd)

Orhue y Uzu (2011) mencionan que existen una relación de diversos factores para que los metales pesados como el Cd estén disponibles para las plantas, dentro de los cuales sobresalen el pH, carbono orgánico, fósforo disponible o lábil, CIC (capacidad de intercambio catiónico), humedad y el estado de cargas de los metales. Estos factores descritos anteriormente al encontrarse en niveles bajos, permiten que los metales pesados estén disueltos en el suelo, lo cual facilita que estos sean utilizables y absorbibles para las plantas. Asimismo, se ha encontrado que el factor pH es el más influyente para que los metales pesados sean disponibles; ya que se descubrió que, subir la concentración iones hidrógeno en el suelo minimiza la disponibilidad de metales pesados (Rodríguez, 2017).

1.2.9. Relación sistema agroforestal y cadmio (Cd)

Los sistemas agroforestales (SAF) son una forma de uso del suelo, donde árboles y arbustos son utilizados en asociación con cultivos para lograr un equilibrio entre el cultivo principal y el entorno natural; asimismo, el mantener una gran biodiversidad permite la formación de un microclima evitando la pérdida de humedad del sistema (Moreira y Castro, 2017).

En un sistema agroforestal, el Cd se comporta de una manera exclusiva debido a la presencia de diversos árboles, los cuales promueven la disminución de su absorción gracias a la actividad de retención de sus raíces, lo que impide la contaminación en la parte aérea de la planta; librando así, la aparición de efectos tóxicos que se produce en los cloroplastos (Lysenko *et al.*, 2015). La parte externa de la raíz de estos árboles ayuda a retener positivamente el Cd y forma una barrera que protege a los protoplastos del cadmio (Mahar *et al.*, 2016). Asimismo, la cabellera radicular de los árboles puede secuestrar Cd; mientras que, la célula del endodermo presenta mecanismos fisiológicos que no dejan pasar el Cd al xilema, minimizando el transporte de este metal a los primeros brotes; además, en plantas leñosas se ha encontrado que la absorción de Cd es realizada por los componentes de la pared celular del órgano radicular, esto demuestra que la absorción de Cd es un mecanismo de tipo primaria que toleran las especies forestales (fitotoxicidad) (Chen *et al.*, 2014).

1.2.10. Factores de suelo y cadmio (Cd) en plantaciones de “cacao”

El Cd es un metal pesado que se encuentra de manera natural en el suelo, sobre todo en terrenos destinados a la agricultura, donde los niveles crecientes del metal generan grandes preocupaciones debido a su movilidad y a la facilidad con que es absorbido por las plantas (Pérez y Azcona, 2012). La planta de “cacao” tiene la capacidad de acumular Cd dentro de su estructura (hoja, tallo, raíz); sin embargo, esta planta presenta la capacidad inherente de fitoacumular Cd en el producto final (fruto) (Antoine *et al.*, 2017).

Existen muchos factores que promueven el incremento de Cd en el suelo, dentro de los cuales sobresalen las características físicas (textura y mineralogía del suelo) y las características químicas del suelo (pH, CIC, CE, contenido de macronutrientes y micronutrientes) (Acosta

y Pozo, 2013). Además, existen otros elementos que participan en el proceso de acumulación de Cd en el suelo, tales como el desarrollo de las actividades antropogénicas, aplicación de fertilizantes fosfatados, agua de riego, deposición atmosférica y el reciclaje de nutrientes; este último, es realizado cuando la planta de “cacao” ha absorbido Cd en los granos, hojas y cáscaras de mazorcas, los cuales al descomponerse liberan el Cd en el suelo; es decir, la planta absorbe este metal del suelo mediante la degradación de los restos orgánicos del “cacao” (Mite *et al.*, 2010).

1.2.11. Cadmio (Cd) en suelos

El Cd en el suelo se puede encontrar de forma natural con concentraciones mayores a los 2 mg.kg⁻¹; asimismo, este metal se encuentra en abundancia en depósitos de suelos cerca a los ríos, rocas volcánicas y suelos de clasificación andesita (Fauziah *et al.*, 2001). Además, dentro de las formas más comunes en las que este metal es agregado al suelo, sobresale la agricultura a través de la aplicación de fertilizantes que contienen fósforo, sumado a esto la aplicación continua, los cuales permiten maximizar la concentración de Cd en el suelo, en específico la roca fosfórica (Bonomelli *et al.*, 2003). Asimismo, el Cd es un metal absorbente y cuanto mayor sea la capacidad de la planta de absorber, estos son localizados rápidamente; sin embargo, la aplicación de abonos orgánicos en el suelo provoca la disminución de Cd, a diferencia de aquellos suelos que tienen bajo contenido de materia orgánica (Eriksson, 1990) El Cd se encuentra en el grupo de los metales pesados y se caracteriza por ser un elemento químico muy móvil, lo que provoca una absorción rápida y fácil para las plantas, a pesar de ser un elemento que no es esencial para su desarrollo (McLaughlin y Singh, 1999). Además, en estudios realizados en un invernadero determinaron que, en suelos ácidos con textura arenosa la disponibilidad del Cd es mínima; sin embargo, en suelos con textura franco, la disponibilidad y acumulación del metal es mayor (He y Singh, 1994).

1.2.12. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas

La planta y hongo al asociarse en un proceso de simbiosis, permiten asegurar la toma de nutrientes debido al crecimiento del micelio extraradicular y esto se manifiesta en porcentaje de colonización radicular; tanto es así, que las micorrizas funcionan como un agente que busca los nutrientes, los absorbe y transporta dentro de la planta (Pérez *et al.*, 2011).

Existen muchos microorganismos en el suelo que causan o promueven el crecimiento de diversas especies vegetales, dentro de ese grupo están las micorrizas arbusculares. El término arbuscular hace referencia a arbusculos, los cuales vienen a ser las llamadas hifas (estructura de los hongos) que se parten de forma dicotómica y entran a las raíces con el único fin de tener refugio en la planta; a cambio, este hongo absorbe nutrientes, en especial al fósforo para el desarrollo de la planta (Quilambo, 2003). Primero se lleva a cabo el crecimiento de las hifas y con el pasar del tiempo estas pasan a convertirse en arbusculos y presentan una espora, que es una célula de tipo asexual, los cuales se encuentran de forma solitaria en grupos (esporocarpos) (Pérez, 2001). Asimismo, estas micorrizas presentan la característica de ser muy resistentes antes los cambios climáticos, mostrando un engrosamiento de su pared, entrando en latencia para así tener sobrevivencia en el tiempo (Alva, 2019).

1.2.13. Micorrizas arbusculares y reducción de cadmio (Cd) en el cultivo de “cacao”

Diversos estudios muestran que usar HMA en plantas, preferentemente en especies vegetales de importancia agrícola, puede disminuir la absorción y toma de metales pesados, como el Cd, dándose a entender que es una parte de un paquete biotecnológico para muchos cultivos agrícolas que pueden ser perjudicados con metales pesados (Aguirre *et al.*, 2011). El comportamiento antes mencionado de las micorrizas arbusculares (HMA) se debe a que mediante las estructuras que poseen estos hongos, como las vesículas e hifas, permiten que la planta genere una tolerancia hacia estos metales pesados (Hildebrandt *et al.*, 2007).

Las micorrizas no solo producen estructuras, sino que también promueven la generación de metabolitos y/o sustancias orgánicas como la glomalina. Este metabolito es una glucoproteína que mediante investigaciones se comprobó que posee acciones de degradación frente al Cd, el cual es capaz de dejar menos del 1 % de cadmio inmóvil en el suelo, actuando como una barrera protectora ante la fitoacumulación (López *et al.*, 2016). La capacidad de inmovilidad del Cd por parte de la glomalina, se debe a la producción de sustancias xenobióticos de los hongos micorrízicos que luego se asocian a las plantas (Aguirre *et al.*, 2011).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

El estudio de investigación desarrollado muestra un diseño experimental bajo condiciones de campo, del tipo descriptiva, correlacional, y enfoque cuantitativo, ya que describió la influencia o relación entre las variables de investigación en la realidad concreta (investigación básica) (Ceroni, 2010).

2.2. Lugar y fecha

La presente investigación se ejecutó en tres sistemas agroforestales de la región San Martín: sistema mixto (Mariscal Cáceres), sistema convencional (Lamas) y sistema ecológico (Rioja); en las cuales se identificaron los clones de “cacao” ICS-95 y CCN-51, en una edad promedio de 6 a 10 años.

El trabajo de recolección de muestras en campo inicio el mes de agosto 2020 y la ejecución en laboratorio se dio inicio en el mes de septiembre 2020, culminando en febrero 2021.

2.3. Población y muestra

La población estuvo constituida por un total de 6 parcelas con plantaciones de “cacao” (2 parcelas por sistema agroforestal) una por cada clon estudiado (ICS-95 y CCN-51), teniendo en cuenta el sistema de siembra (mixto, convencional y ecológico).

Las muestras estuvieron conformadas por 6 plantas por cada sistema de siembra (1 planta equivalente a una unidad experimental y 3 repeticiones por clon estudiado) dando en total 18 unidades para los análisis de cadmio (Cd) en suelo, hojas y granos. Para el análisis de

caracterización físico-químico, se tomaron seis muestras de suelo en forma de zig-zag dentro de cada sistema de siembra (Arévalo *et al.*, 2016).

2.4. Análisis estadístico de datos

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 3 X 2, donde el factor “A” fueron los sistemas de siembra (mixto, convencional y ecológico) y el factor “B” fueron los clones de “cacao” (ICS-95 y CCN-51). Teniendo 6 tratamientos y 3 repeticiones por cada uno, siendo cada repetición una unidad experimental (una planta de “cacao”), resultando un total de 18 unidades (Tabla 1). Los datos fueron tabulados en hojas de cálculo Excel, se analizaron el efecto de los factores y su interacción, los supuestos del análisis exploratorio de datos, la normalidad de los mismos y homocedasticidad de las varianzas fueron comprobados utilizando las pruebas de Shapiro Wilk y Levine. Mediante estos primeros resultados se transformaron o no los datos a la función correspondiente que se adecuó a la naturaleza de los mismos. Luego se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para comprobar la significancia o no de las variables, y según estos resultados se realizó un análisis más profundo mediante la prueba post-hoc de Tukey con una probabilidad de error del 5 %, para determinar en qué nivel de los factores o interacción hay o no significancia. Para realizar estos análisis se utilizó el paquete estadístico InfoStat (version 2012e; Córdoba, Argentina) (Di Rienzo *et al.* 2019).

Tabla 1

Descripción de tratamientos en estudio

Sistema de siembra (Factor A)	Clones (Factor B)	Repeticiones	Tratamientos
Mixto (M)	ICS	3	T1
Mixto (M)	CCN	3	T2
Convencional (C)	ICS	3	T3
Convencional (C)	CCN	3	T4
Ecológico (O)	ICS	3	T5
Ecológico (O)	CCN	3	T6

2.4.1. Prueba de correlación

Se realizó la prueba de correlación entre las variables micorrízicas y el contenido de cadmio (Cd) en suelos, granos y hojas, en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico

en los clones ICS-95 y CCN-51. Para lo cual se estudió la relación estadística entre estas dos variables continuas.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

2.5.1. Muestreo de suelo

- Se tomaron muestras de suelo de las parcelas identificadas, para lo cual se consideró la Guía para muestreo de suelos, establecidos por el Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014) y el Protocolo de muestreo de suelos con cadmio en zonas cacaoteras (R.M. N°007-2019- MINAGRI), establecidas por Ministerio de Agricultura [MINAGRI] (2019).
- Se realizó el muestreo de identificación (MI) que tuvo como finalidad explorar la presencia de contaminación del suelo a través de la adquisición de muestras características, para verificar si el suelo sobrepasó los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecido en el D.S. N°011-2017-MINAM (Ministerio del ambiente [MINAM] (2017); asimismo, se comparó los valores de fondo de acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 002-2013-MINAM (Ministerio del ambiente [MINAM], 2014).
- Para la toma de muestras de suelo, se utilizó la técnica de muestreo simple, el cual se emplea en suelos contaminados y también en la caracterización de los mismos. En suelos agrícolas la profundidad de muestreo fue de: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm. Los resultados se observan en el Apéndice 3.

El Muestreo integral (MI) mediante la obtención de muestras representativas en las plantaciones de “cacao” de las parcelas de estudio, tuvo por objetivo determinar a nivel de superficie y profundidad la concentración de Cd superiores al valor establecido en los modelos de calidad ambiental de suelos. Para el caso de suelos de “uso agrícola” el valor establecido fue de 1,4 mg de Cd total/kg de suelo seco (Ministerio de Agricultura [MINAGRI], 2019).

2.5.2. Colonización micorrízica

Para el cálculo de la colonización micorrízica se utilizaron las raíces jóvenes de “cacao” recolectadas de las parcelas en estudio; asimismo, se hizo la clarificación y tinción mediante la técnica de clareo y tinción establecido por Phillips y Hayman (1970), adaptado para raíces leñosas.

2.5.3. Intensidad micorrízica

Para el cálculo de la intensidad micorrízica, se usó la metodología establecida por Trouvelot *et al.* (1986), el cual se detalla a continuación:

- Teniendo la muestra radicular se seleccionaron 20 cortes de raíces finas, donde cada corte obtuvo una longitud de 1 a 2 cm de largo aproximadamente, para luego ser montados sobre láminas portaobjetos; posteriormente, estas fueron llevadas al microscopio para observarlos con aumentos de 40x y 100x. Para la evaluación se consideraron seis categorías de 0 a 5, expresado en porcentaje que variaron desde 0 % a > 95 %, donde cada categoría o escala fue desarrollada a simple vista.
- Finalmente, se procedió a calcular el porcentaje de intensidad micorrízica mediante la siguiente fórmula:

$$\% IM = (n1 + 5(n2) + 30(n3) + 70(n4) + 95(n5))/N$$

Donde:

N= Número total de segmentos observados.

n=Números de segmentos asignados con el índice 0, 1, 2, 3, 4 y 5.

2.5.4. Evaluación de longitud de micelio extraradical (MER)

El MER forma la interface activa entre el suelo y la planta, y se le considera la estructura más importante para el cumplimiento de diversas funciones de las micorrizas en cuanto a la absorción de minerales y agua (Whittingham y Read, 1982). La determinación de su longitud por unidad de masa de suelo es un indicador del posible beneficio que reciben las plantas y

su contribución al mejoramiento en las propiedades físicas del suelo (Tisdall, 1991). La metodología utilizada para la evaluación de longitud de Micelio Extrarradical fue la propuesta por Newman (1966), el cual se resume en la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\pi AN}{2H}$$

Donde:

R= Longitud de micelio por unidad de peso de suelo.

A= Área de la placa.

N= Número de intersecciones línea/hifa.

H= Longitud total de las líneas de la placa (en cm).

2.5.5. Extracción de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

Para determinar los consorcios de las micorrizas primero se realizó el aislamiento de esporas de las muestras del suelo colectadas de las parcelas en estudio. El aislamiento fue desarrollado a través del método de tamizado húmedo y decantación, utilizado por Gerdemann y Nicolson (1963); seguidamente se realizó la centrifugación en dos concentraciones que son al 20 % y 60 % de sacarosa (Sieverding y Leihner, 1984).

2.6. Descripción de la investigación

2.6.1. Descripción de la actividad en campo

a. Localización y georreferenciación de plantaciones de “cacao”

En la Figura 1 se visualiza el mapa de ubicación geográfica del área de estudio, donde se localizaron las parcelas con plantaciones de “cacao” en tres sistemas agroforestales de la región San Martín (mixto, convencional y ecológico), se seleccionaron plantaciones clónales en producción entre 6 y 10 años de edad. En el sistema mixto, distrito de Juanjuí, sector Villa Prado, se identificó las dos primeras parcelas con clones ICS-95 y CCN-51, ambas parcelas de “cacao” presentaron una edad promedio de 10 años de producción.

En el sistema convencional, sector Palmiche se identificó la parcela de “cacao” con el clon ICS-95 y una parcela con el Clon CCN-51 ubicada en el centro poblado Cedro Pampa, distrito de Zapatero; ambas parcelas presentaron una edad promedio de 10 años de producción.

Asimismo, en el sistema ecológico, distrito de naranjos, centro poblado Yarinal se identificó las dos últimas parcelas clon ICS-95 y CCN-51, con 8 años de producción. Además, se obtuvieron datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para obtener información sobre los datos climatológicos (ver Apéndice 4); asimismo, en la Tabla 1 se muestra la georreferenciación de las parcelas identificadas y seleccionadas.

Figura 1

Mapa de ubicación geográfica del área de estudio

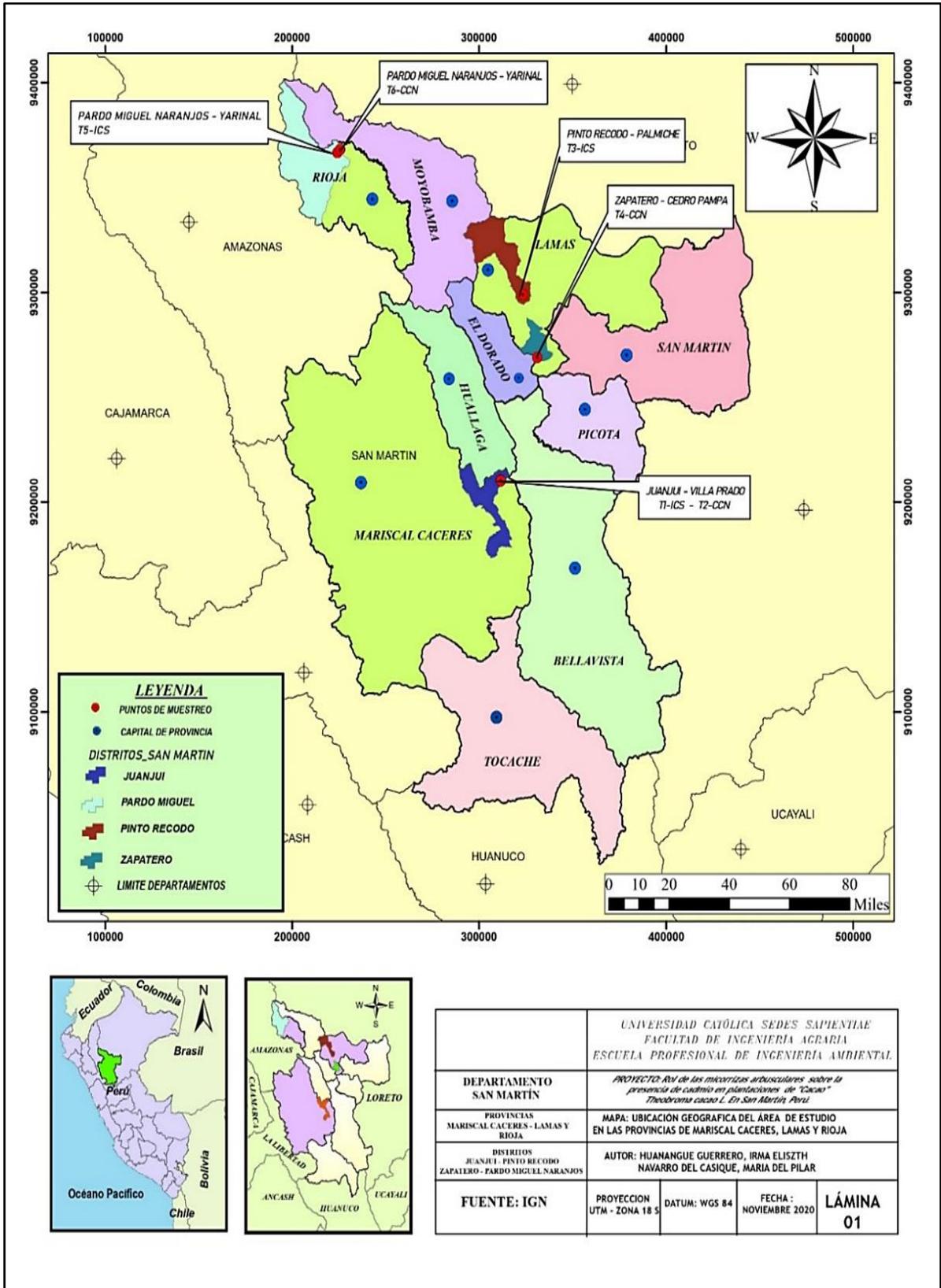


Tabla 2*Georreferenciación de plantaciones de “cacao”*

Sistema de siembra	Distrito	Sector	Altitud m s.n.m	X	Y
Mixto	Juanjuí	Villa Prado	326	311368	9210306
	Juanjuí	Villa Prado	325	311386	9210246
Convencional	Pinto Recodo	Palmiche	800	323397	9298926
	Zapatero	Cedro Pampa	946	330874	9268957
Ecológico	Pardo Miguel	Yarinal	947	224254	9366680
	Naranjos				
	Pardo Miguel	Yarinal	902	225819	9368094
	Naranjos				

b. Identificación de parcelas cacaoteras para la extracción de HMA

Para la extracción de HMA se procedió a la identificación de las parcelas en los tres sistemas agroforestales de la Región San Marín (mixto, convencional y ecológico), con las características correspondientes: clones de “cacao” variedades ICS-95 y CCN-51 (Figura 2). Seguidamente, se ubicaron tres plantas de “cacao” por cada parcela; y finalmente, se procedió a la codificación de cada planta seleccionada en cada parcela, con la información necesaria (Número de tratamiento, clon, lugar y fecha).

Figura 2

Identificación de las parcelas CCN - 51 y ICS – 95



Nota. (A) Limpieza de las parcelas y (B) Codificación de la parcela para la recolección de muestras.

Se procedió a registrar los datos de las parcelas con clon CCN-51 e ICS-95 (Figura 3), el cual estuvo basado en reunir información general de las parcelas seleccionadas tales como: ubicación, edad, propietario, variedad, especies forestales, altitud, cantidad de plantas sembradas, tipo de siembra, número de frutos, ramas, entre otros.

Figura 3

Registro de datos de las parcelas clon CCN-51 e ICS-95



Nota. (A) Toma de apuntes de la ubicación, nombre del propietario, variedad, edad, especies forestales, altitud, entre otros de la parcela seleccionada y (B) Verificación de las condiciones en la que se encuentran los frutos, hojas, ramas, etc.

c. Identificación y selección de mazorcas de clones “cacao” (ICS-95 y CCN-51)

Para la selección de mazorcas se siguió la metodología establecida por Vanderschueren *et al.*, (2021), donde se recolectó mazorcas maduras de cada planta codificada (Figura 4), las que se encontraron en buenas condiciones sin daños de enfermedad o daños físicos; posteriormente, se llevó a cabo el pesado y corte de los frutos para obtención de las almendras de “cacao”.

Figura 4

Recolección de frutos maduros para el análisis de Cd en las almendras del “cacao”



Nota. Identificación de mazorcas maduras y en buen estado y (B) Recojo de los frutos para realizar el cortado y pesado.

d. Toma de muestras para colonización micorrízica y longitud de micelio

Para la recolección de raíces se empezó con la limpieza de hojarasca y residuos alrededor de cada planta y en dirección vertical de la copa, en cada parcela se consideraron tres muestras que fueron mezcladas y homogenizadas (Vallejos *et al.*, 2021). Luego, se tomaron muestras de raíces secundarias y terciarias de todo el contorno de la planta de “cacao”, a un metro de distancia desde el tronco (Figura 5); después, las raíces fueron depositadas en bolsa ziploc, se codificaron y se llevaron a laboratorio para su tratamiento y seleccionado respectivo.

En el laboratorio se realizó la separación y selección de las mejores raicillas a tomar como muestra. Estas fueron colocadas en frascos de vidrio de 400 ml con contenido de alcohol diluido al 70 %, con el fin de lograr mayor tiempo de conservación. Todos los frascos se pusieron a refrigeración a una temperatura de 4 °C.

Figura 5

Toma de muestras para colonización micorrízica

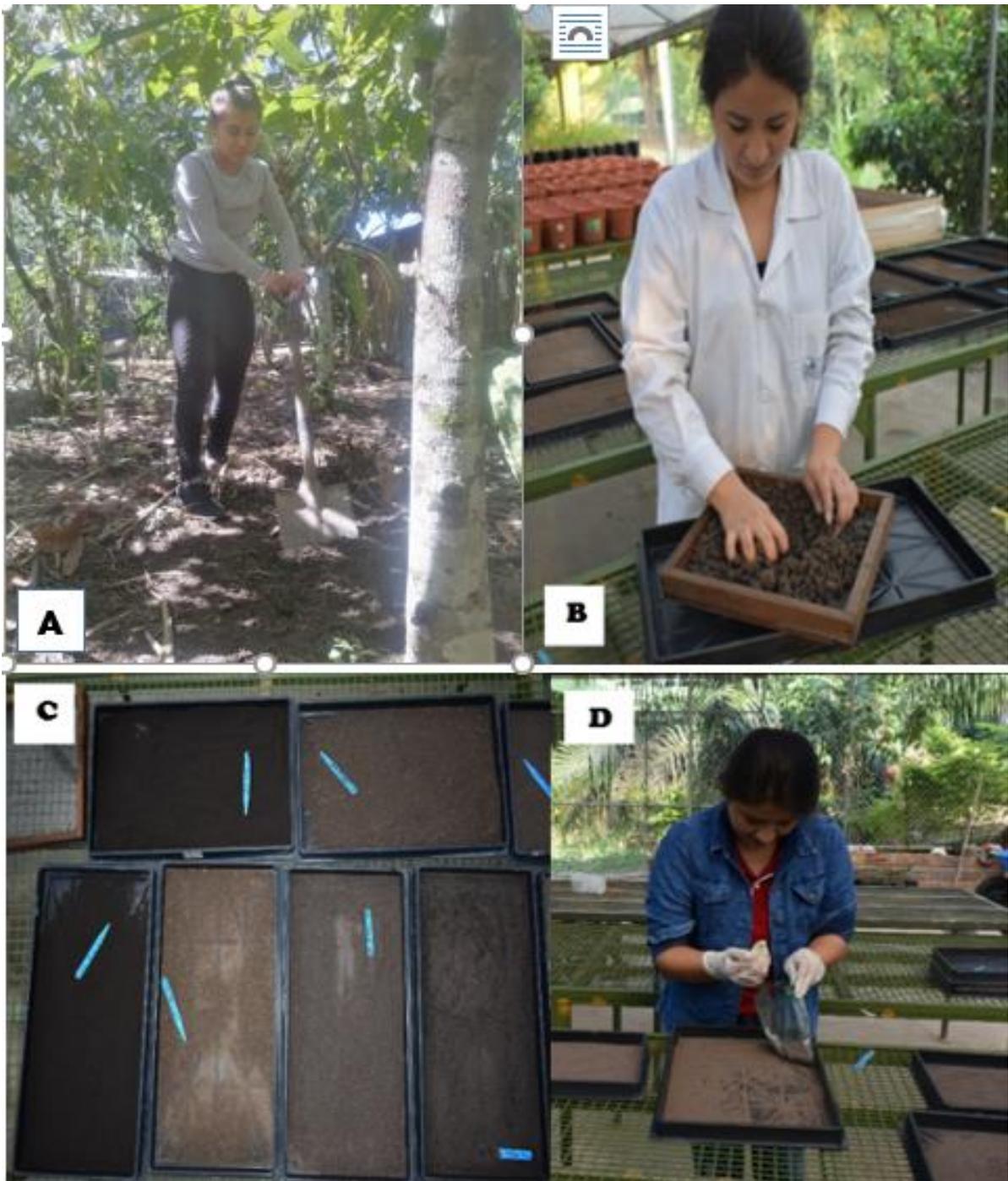


Nota. (A) Limpieza del lugar para extraer las raíces, (B) Extracción de raíces secundarias y terciarias para determinar la colonización micorrízica, (C) Muestra de raíces secundarias y terciaria, (D) Selección y separación de raicillas para el análisis, (E) Muestras en frascos de vidrio de 400ml con contenido de alcohol al 70% para evaluar HMA.

En la Figura 6 se visualiza el muestreo para determinar la longitud del micelio, para la toma de muestras se realizó hoyos de 0-20 cm de profundidad en 4 puntos, se eligieron 3 plantas del total, donde se obtuvieron alrededor de 2 100 g de tierra por cada parcela y se depositaron en una bolsa ziploc las muestras fueron rotuladas y trasladadas al laboratorio de Biología, donde se homogenizó y se secó para su posterior evaluación del micelio extraradical (MER).

Figura 6

Muestreo para determinar la longitud del micelio



Nota. (A) Toma de muestra de suelo, (B) Cernido de la muestra de suelo, (C) Secado a T° ambiente de la muestra, (D) Almacenado de muestras de suelo para su análisis.

e. Muestreo para análisis de cadmio (Cd) en suelos, hojas y granos de “cacao”

Para el muestreo se siguió los lineamientos de muestreo para la determinación de los niveles de cadmio en suelos, hojas, granos y productos derivados del “cacao” (R.M. N°0451-218-MINAGRI), establecidos por el Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI] (2018).

– Muestras de suelo

En la Figura 7 se visualiza la toma de muestras de suelo para el análisis de Cd. Se realizó la limpieza de malezas en todo el contorno de la planta en dirección vertical a la copa; posteriormente, se procedió a realizar hoyos de 0 a 30 cm en los 3 puntos de cada planta, se extrajo un corte de 0 a 20 cm de suelo y se tomó como muestra para análisis de Cd; seguidamente, se recolectó 2 kg de muestra del suelo para el análisis fisicoquímico de suelos, obteniendo un total de 06 muestras recolectadas para el primer análisis de caracterización y 18 muestras para el análisis de Cd.

Asimismo, las muestras fueron rotuladas y trasladada al laboratorio para homogenizar, cernir y dejar secar; posteriormente, estas fueron llevadas al laboratorio de Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) para su respectivo análisis y evaluación de Cd (ver Apéndice 5). Todos los materiales utilizados se desinfectaron con alcohol de 70 ° antes y después de extracción de las muestras para evitar contaminación.

Figura 7

Toma de muestras para análisis de Cd en suelo



Nota. (A) Limpieza del contorno de la planta, (B) Excavación de un hoyo de 30 cm para recolectar una muestra de 20 cm, (C) Muestra de suelo de 20 cm, (D) Secado de la muestra homogenizada, (E) Muestras rotuladas y codificadas para su análisis físico-químico y cadmio.

– Muestras de hojas

Se recolectaron 4 hojas enteras sin presencia de plagas ni enfermedades de cada planta de los tratamientos, teniendo 3 plantas por cada uno, haciendo un total de 18 plantas en dirección a los puntos cardinales por cada tratamiento para el análisis foliar, donde cada muestra se tomó de la parte media de las plantas, comenzando desde la parte superior hasta el centro de la espiga; posteriormente, se depositaron cuidadosamente en sobres manila y se enviaron al laboratorio para su respectivo análisis (ver Apéndice 6). En la Figura 8 se visualiza el muestreo para el análisis foliar.

Figura 8

Tomas de muestra para análisis foliar



Nota. Recolección de hojas sanas en dirección a los 4 puntos cardinales, para análisis foliar.

– Muestreo de granos de “cacao”

Se recolectó la mazorca madura del “cacao” según tratamientos, se realizó el pesado de cada mazorca, luego se extrajeron los granos, los cuales fueron colocados en una bolsa plástica

(ziploc) con orificios y se dejó fermentar por un lapso de 5 días, finalmente fueron secadas bajo sombra en un ambiente cerrado y limpio para evitar cualquier contaminación, las muestras fueron trasladadas al laboratorio para su respectivo análisis de Cd (ver Apéndice 7). En la Figura 9 se visualiza la recolección de mazorcas para el análisis de Cd en almendras (granos) de “cacao”.

Figura 9

Recolección de mazorcas, para análisis de Cd en las almendras de “cacao”



Nota. (A). Recolección de fruto maduro, (B). Pesado del fruto y almendras de “cacao”, (C). Colocación de las almendras de “cacao” en bolsa ziploc y (D). Muestras de almendra de “cacao” para el proceso de fermentación y secado.

2.7. Descripción de la actividad en vivero

a. Secado de muestras biológicas

Se realizó el muestreo de suelo, solo una fracción fue apartada y colectada en bolsas especiales ziploc que fueron almacenadas entre 4 °C a 6 °C de temperatura para luego ser analizados en el laboratorio de biología y genética molecular de la UNSM, la segunda fracción fue llevado al Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) para su caracterización física y química. Las raíces extraídas fueron lavadas con agua a presión para retirar las partículas del suelo adheridas a ellas; asimismo, de toda la masa radicular colectadas, solamente se seleccionaron a aquellas raíces muy finas; de ahí se hicieron cortes de 1 a 2 cm de longitud para ser colocados en tubos de ensayo de 50 ml conteniendo alcohol de 70°, para su posterior conservación a temperaturas de 4 °C a 6 °C para su respectivo análisis de colonización micorrízica.

b. Análisis físico – químico del suelo

Se realizó el análisis físico y químico de 6 muestras recolectadas en los tres sistemas agroforestales (mixto, convencional y ecológico). En el análisis se determinó las características físicas como la textura; y para las químicas, el % de materia orgánica, pH, C.E, CaCO₃, nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros elementos más. En la Tabla 3 se muestra los métodos utilizados en laboratorio para realizar la caracterización del suelo.

Tabla 3*Métodos utilizados en laboratorio para realizar la caracterización del suelo*

Descripción	Método
Textura	Hidrómetro
pH	Potenciómetro suspensión suelo-agua-relación 1:2,5
Conductividad eléctrica	Conductímetro suspensión suelo-agua 1:2,5
Carbonatos	Gas-volumétrico
Fósforo disponible	OLSEN modificado EXTRACT. Na HNO ₃ = 0,5 M, pH 8,5
Potasio y Sodio intercambiable	(CH ₄) CH ₃ -COOH=1N, pH 7, absorción atómica
Materia Orgánica	WALKLEY y BLACK
Calcio y Magnesio intercambiable	EXTRACT. KCl =0,1N 6 (NH ₄) CH ₄ -COOH=1N, pH 7. Absorción atómica
Acidez intercambiable	EXTRACT. KCl 0.1N, Volumetría
Acidez potencial	WOODRUF modificado
CIC pH 7,0	Acidez potencial + suma de bases
Fe, Cu, Zn y Mn	OLSEN modificado EXTRAC. Na HCO ₃ =0,5M, pH 8,5. Absorción Atómica
Boro	EXTRACT (Ca[H ₂ PO ₄] ₂ .H ₂ O). Espectrometría UV Vis
Azufre	EXTRACT (Ca[H ₂ PO ₄] ₂ .H ₂ O) fosfato de calcio. Turbidimetría
Metales pesados	EPA 3050B (ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS)

2.8. Descripción de la actividad en laboratorio**a. Colonización micorrízica en plántones de “cacao”**

Se tomaron 18 muestras para verificar la colonización micorrízica, el cual fue desarrollada en el laboratorio, donde se identificó los HMA; para ello, se usó la técnica de clarificación

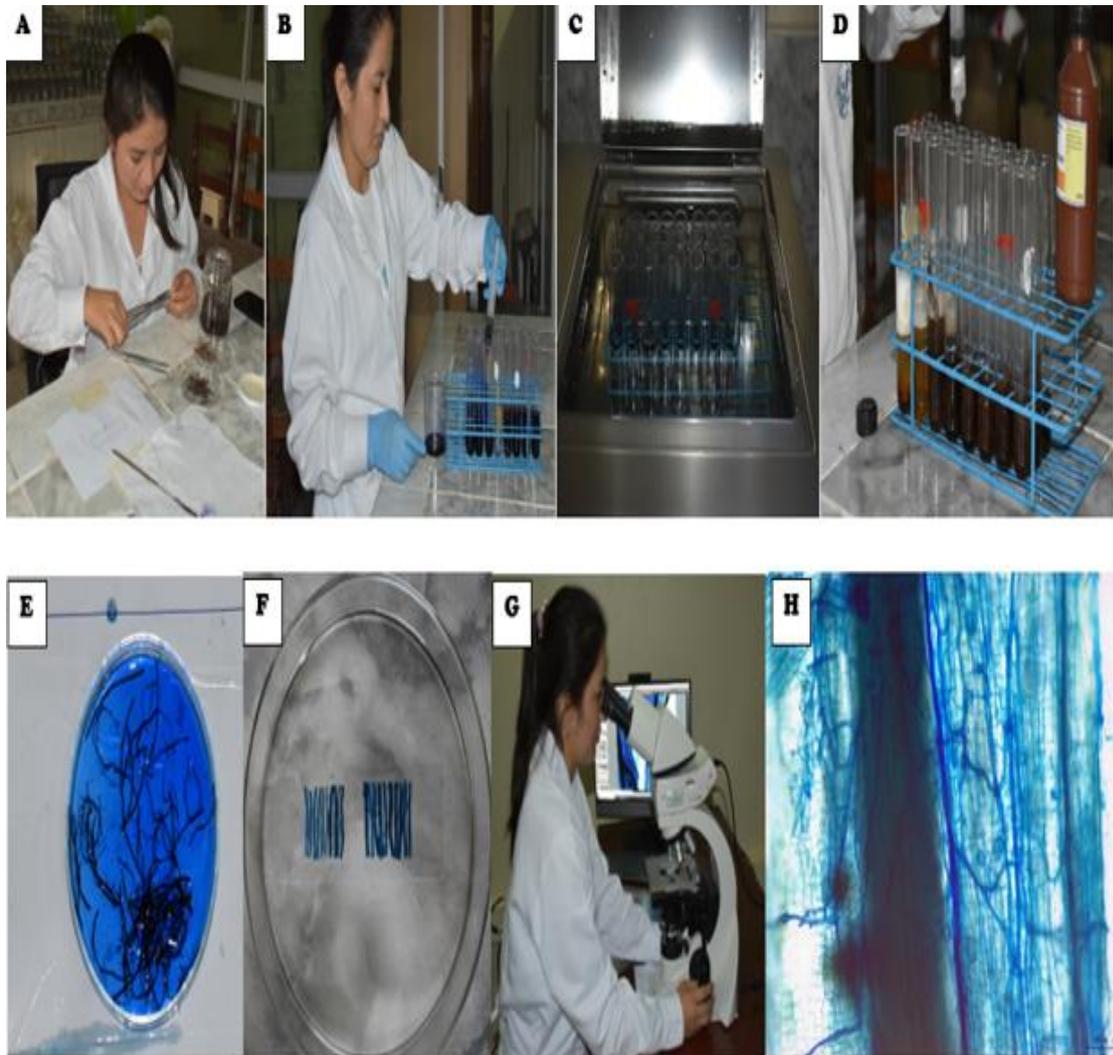
y tinción de raíces adaptado para raíces de especies perennes, establecida por Phillips y Hayman (1970), el cual se detalla a continuación:

- Se llevó a cabo los análisis de todas las muestras (tratamientos) que se obtuvieron durante el trabajo de campo; asimismo, se eliminó aquellos elementos que fueron adheridos a la superficie de las raíces muy finas; para ello, se procedió a lavar con agua a chorro sobre un tamiz, donde se seleccionó las raíces muy finas (raíces secundarias).
- Para eliminar el agua sobrante en las raíces después de lavarlos, estas fueron puestas en un papel absorbente para su deshidratación; luego, las raíces secundarias fueron puestas en un tubo de ensayo con concentración del 10 % de KOH, por un periodo de 24 horas, intercambiando el hidróxido de potasio cada 4 horas.
- Pasado las 24 horas, nuevamente se aplicó KOH al 10 % a las raíces, para luego llevarlos al baño maría a 90 °C, por un periodo de 30 minutos, con el fin de sacar todo el citoplasma y esclarecer el tejido cortical, luego se lavó tres veces con agua a presión hasta eliminar todo el hidróxido de potasio.
- A continuación, las raíces fueron bañadas con agua oxigenada por 15 minutos a temperatura de ambiente, con la finalidad de mostrar los pigmentos radiculares y se lavaron de 2 a 3 veces con vinagre blanco (ácido acético) para la acidificación de las muestras.
- Finalmente, las raíces fueron bañadas en tinta Parker (5,26 %) y llevadas nuevamente al baño maría a 90 °C, por un tiempo de 30 segundos; después, usando el ácido acético fueron lavados entre 2 a 3 veces para la disminución de la tinta. Finalmente, las raíces se conservaron en lacto glicerol hasta su examinación.

En la Figura 10 se visualiza el proceso de cuantificación de la colonización micorrízica en plántones de “cacao”.

Figura 10

Proceso de cuantificación de la colonización micorrízica en plántones de “cacao”



Nota. (A). Selección de las raíces más finas llamadas raíces secundarias, (B). Colocación de las raíces por 24 horas en un tubo de ensayo con concentración del 10 % de KOH, (C). Raíces puestas en baño maría a 90°C por 30 min, (D). Bañado de las raíces con agua oxigenada, se dejó por 15 minutos a T° ambiente, (E). Colocación en una placa Petri después de ser bañadas con tinta Parker, llevadas al baño maría, (F). Conservación de las raíces con lactoglicerol después de ser lavados con ácido acético, (G). Observación en el microscopio, (H). Muestra obtenida para la cuantificación de colonización micorrízica.

b. Obtención del micelio extraradical (MER)

La obtención del Micelio Extrarradical fue desarrollado siguiendo la metodología de intersección de líneas establecido por Newman (1966), cual consta de los siguientes pasos:

- Se pesó 1 g de suelo seco al aire y se colocó en un vaso de precipitación de 200 ml; posteriormente, se colocó aproximadamente 20 ml de ácido acético (vinagre blanco), para acidificar el micelio (dejando por 10 minutos a temperatura ambiente). La función

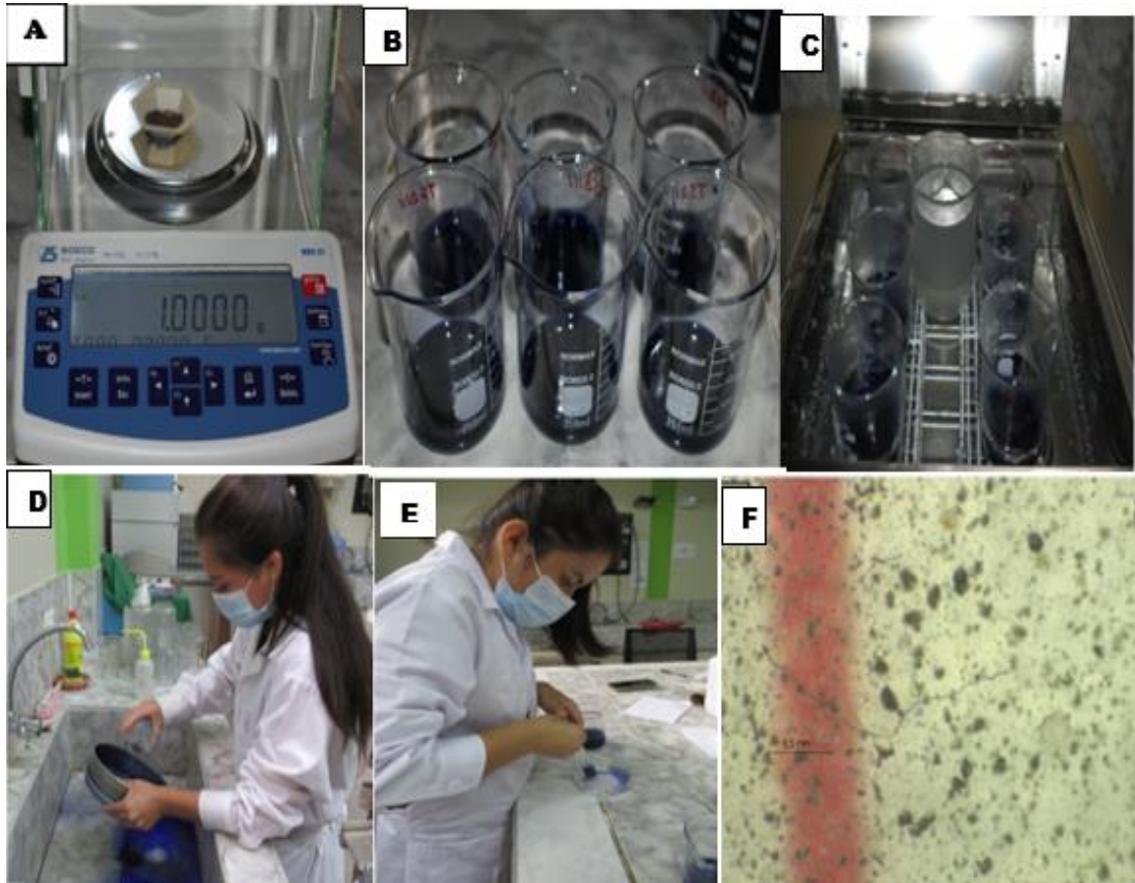
que cumplió el ácido acético fue para diseminar los agregados del suelo y acidificar los cortes del micelio.

- Se añadió 20 ml de tinta Parker al 5,27 % diluido en vinagre (ácido acético) por 30 minutos, a temperatura ambiente; seguidamente, se enrazó a 100 ml con agua destilada y la muestra se dejó en el baño María a 90 °C, por un tiempo de 90 minutos, agitando constantemente.
- Para eliminar las partes más finas del suelo que podrían dificultar el análisis del micelio, la mezcla pasó a través de una serie de tamices de 250 a 38 µm; este proceso fue realizado con la finalidad de recuperar cuantitativamente el material atrapado entre los dos tamices; seguidamente, la mezcla fue depositado en un vaso de precipitados y luego se enjuagó con agua destilada (30 ml).
- La muestra fue calentada en baño María (90 °C) durante 1 minuto y se enrazó a 100 ml (agregando 70 ml con agar-agar al 0,64 %). Esta solución se dejó por aproximadamente 5 minutos más en baño María (90 °C), donde la concentración final de la solución obtenida fue de 0,45 % de agar-agar.
- En el baño María se agitó la mezcla para homogenizar la suspensión y de la cual se tomó 10 ml con una jeringa y se depositó este volumen distribuyendo homogéneamente, en una placa Petri.
- Finalmente, se dejó enfriar hasta la formación de un gel semisólido, el cual fue observado en un microscopio estereoscopio a 5 X de aumento, colocando en la base de la placa una rejilla cuadrículada de exactamente 0,5 cm².

En la Figura 11 se visualiza el Proceso del muestreo para la obtención de Micelio extraradical (MER)

Figura 11

Proceso del muestreo para la obtención de Micelio extraradical (MER)



Nota. (A) Pesado de 1g de suelo, (B) Colocación en un vaso precipitado de 200ml con una pequeña cantidad de vinagre, se dejó reposar por 10 min, (C) Colocación en Baño María con 20 ml de solución Pelikan al 10% por 90 minutos, (D) Solución pasada por tamices con diferente luz de malla 38 μm , (E) 10 ml de solución puesta en una placa Petri mediante una jeringa, enfriando hasta formar un gel semisólido y (F) Gel semisólido observado en el estereoscopio a 5x de aumento se visualiza de color azul el micelio extraradical (MER).

c. Extracción de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

La extracción de esporas de HMA se llevó a cabo siguiendo la metodología establecida por Gerdemann y Nicolson (1963), el cual se detalla a continuación:

- Se pesaron 10 g de suelo de cada muestra, luego fue homogenizado para ser colocado en un envase conteniendo un litro de agua; seguidamente, se agitó manualmente con una varilla de madera por 10 segundos y se dejó reposar por un tiempo de 20 segundos, para que las partículas mayores se precipiten.
- A continuación, el sobrenadante pasó por tamices de 250 μm y 38 μm ; con repeticiones de hasta 5 veces; posteriormente, se puso 20 ml de solución sacarosa al 20 % y 10 ml

de solución sacarosa al 60 %, en un tubo falcón de 50 ml, con el fin de que las soluciones no se mezclen entre sí y el material resultante del tamiz de 38 μm fue puesto en el mismo tubo falcón de 50 ml, los cuales fueron colectadas con una Pizeta conteniendo agua de caño.

- Posteriormente, cada tubo falcón fue centrifugado (para evitar variación en el movimiento de la centrifuga) a 3 500 rpm/5 minutos, para precipitar las partículas de suelo y dejar que las esporas sean suspendidas; después el sobrenadante fue apartado y dejado en un tamiz de 38 μm para luego lavar con agua de caño y suprimir la sacarosa, dejando solamente las esporas.
- Finalmente, con la ayuda de una pizeta conteniendo agua de caño, se extrajo los residuos de suelo y esporas del tamiz de 38 μm , para luego poner en una placa Petri y proceder al conteo y selección de esporas con un estereomicroscopio de 3 a 5 X de aumento.

En la Figura 12 se visualiza el proceso para la extracción de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

Figura 12

Proceso para la extracción de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)



Nota. (A) Disolución de 10g de suelo en un litro de agua, (B) Vertido de la solución en tamices de 250 y 38 micras, (C) Imagen del resultado del vertido de la solución en los diferentes tamices, (D) Solución vertida en tamiz de 38 micras colocada en un tubo falcón, (E) Solución adicionada 30 ml de agua corriente y llevado a la centrifuga, (F) Colocación del sobrenadante en un tamiz de 38 micras con agua corriente y eliminar la sacarosa.

2.9. Identificación de variables y su mensuración

El estudio de las variables y su mensuración se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4*Identificación de variables*

Variables	Indicador
Variable independiente	I1: Porcentaje de colonización micorrízica.
X1: Hongos Micorrízicos	I2: Longitud de micelio extraradical.
Arbusculares Nativos	I3: Densidad de esporas
Variable dependiente	I1: Porcentaje de Cd en suelo de dos clones de “cacao”
X1: Presencia de cadmio	I2: Porcentaje de Cd en hojas de dos clones de “cacao”
(Cd)	I3: Porcentaje de Cd en las almendras de dos clones de “cacao”

a. Porcentaje de colonización micorrízica

Para calcular el porcentaje de colonización micorrízica se recolectó muestras de raíces secundarias y terciarias de cada planta de “cacao” de los clones ICS-95 y CCN-51; posteriormente, una vez obtenida las muestras se llevaron a laboratorio para realizar la selección de las mejores raíces. Preparado todas las muestras se usó la técnica de clarificación y tinción formulado por Phillips y Hayman, (1970), rectificado para raíces de especies perennes; finalmente, se calculó la intensidad micorrízica.

b. Longitud de micelio extraradical

Se utilizó 1 g de suelo de las plantas seleccionadas de cada parcela de “cacao”, para este proceso se siguió la metodología propuesta por Newman (1966). Se hizo una repetición de 3 veces por tratamiento para lograr obtener un mejor resultado de la longitud del micelio. Todo el proceso de evaluación se llevó a cabo en laboratorio.

c. Porcentaje de cadmio (Cd) en suelo de dos clones de “cacao”

Para la evaluación se obtuvieron las muestras de suelo de manera aleatoria con la técnica aplicada de muestreo de identificación; estas muestras fueron llevadas al laboratorio para homogenizarlas y posteriormente fueron enviadas al laboratorio del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) para su examinación. Las concentraciones fueron medidas en ppm, cuyos

resultados obtenidos fueron comparados con los ECA para suelo. También se realizó el análisis de caracterización física y química de las muestras de suelo.

d. Porcentaje de cadmio (Cd) en hojas de dos clones de “cacao”

Se realizó mediante el diagnóstico foliar para determinar los niveles de concentración de Cd en las hojas del cacao de los clones ICS-95 y CCN-51 en unidades de ppm, para ello se siguió los lineamientos de muestreo para la determinación de niveles de cadmio en suelo, hojas, granos y productos derivados del “cacao” (MINAGRI, 2018).

e. Porcentaje de cadmio (Cd) en los granos de dos clones de “cacao”

Para la evaluación de Cd en granos de “cacao” siguió los lineamientos de muestreo para la determinación de niveles de cadmio en suelo, hojas, granos y productos derivados del “cacao”.

2.10. Materiales y equipos

– Campo y vivero

- Botas
- Capota
- Cámara profesional
- Machete y palana
- Rafia y saco de polietileno
- GPS
- Lapicero indeleble
- Cuaderno de campo
- Etiquetas de plástico
- Etiquetas blancas
- Bolsa ziploc
- Tijera de podar
- Balanza
- Mandil

– Laboratorio

- Tinta Parker
- Tamiz de 38 μm y 250 μm
- Placas Petri
- Centrífuga de 5000 rev.
- Tubos falcón
- Pizeta
- Micropipetas
- Centrómetros
- Tubos de ensayo
- Baño María
- Microscopio
- Estereomicroscopio binocular
- Mandil guardapolvo
- Guantes

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Contenido de cadmio (Cd) en suelo, hojas y granos en “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51

3.1.1. Contenido de cadmio (Cd) en suelos

La Tabla 5 muestra el Análisis de Varianza, para el contenido de cadmio (Cd) en suelo en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51. En donde existen diferencias significativas en el modelo y el factor sistemas de siembra, en el factor clones y la interacción de ambos no mostró significancia, mostrando una media de 0,22 ppm, con un Coeficiente de Variabilidad (C.V) de 24,04% y un Coeficiente de Determinación (R^2) de 62%, resultados que se encuentran dentro del rango de dispersión aceptable para trabajos realizados en campo según Calzada (1982). Datos transformados a función Raíz Cuadrada (X).

Tabla 5

Análisis de varianza para el contenido de cadmio en suelo de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo

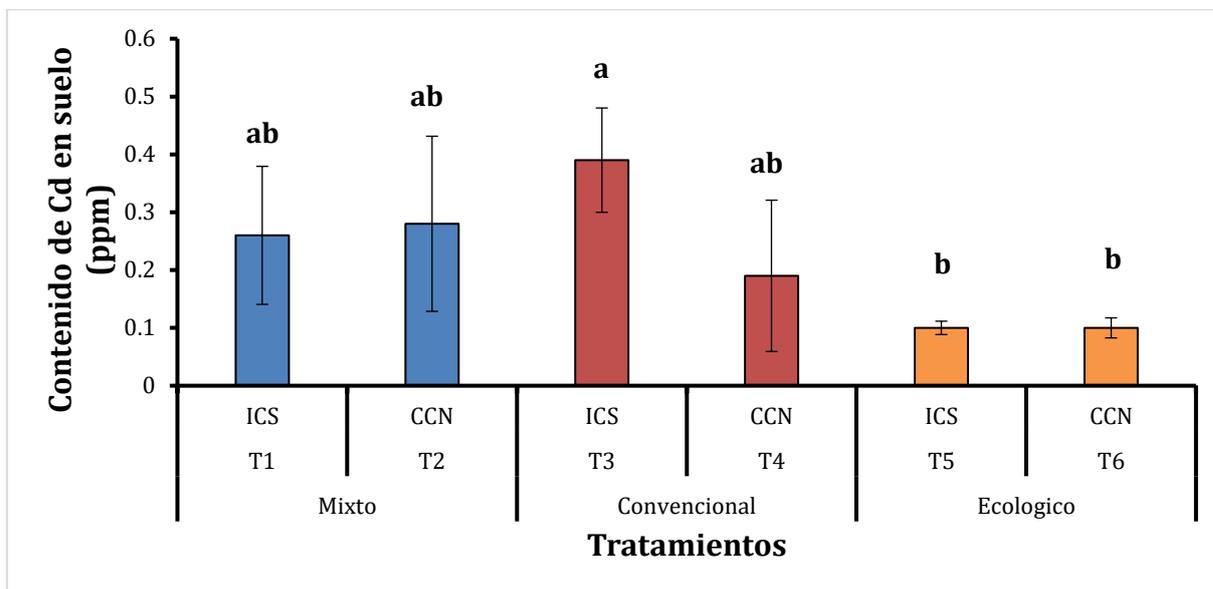
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Sign.
Modelo	0,22	5	0,04	3,9	0,0249	*
Sistemas de siembra (Factor “A”)	0,16	2	0,08	7	0,0097	**
Clones (Factor “B”)	0,02	1	0,02	1,44	0,2536	N. S
Sistemas de siembra*Clones de “cacao”	0,05	2	0,02	2,02	0,1751	N. S
Error	0,14	12	0,01			
Total	0,26	17	0,01			

** y *= Significativo N. S= No Significativo

La Figura 13 muestra los resultados de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para el contenido de Cd (ppm) en suelos de “cacao”, donde el mayor contenido se dio en el sistema convencional (ICS-95) con un promedio de 0,39 ppm, seguido de los tratamientos del sistema ecológico (ambos clones) y el clon CCN-51 del sistema convencional, todos ellos con la misma letra de diferenciación estadística (a), entendiéndose que todos estos tratamientos comparten relatividad entre sus medias y no hay ninguno que se diferencie uno sobre otro, a excepción de los clones del sistema ecológico quienes tuvieron medias de 0,1 ppm (ambos). Además, en el ANOVA se explica que no hubo significancia entre los clones estudiados y menos en la interacción de ambos factores, quiere decir, no hubo especificidad del Cd con algún clon, lo que si se vio en los sistemas de siembra que tuvieron significancia y todo esto se verifica con el análisis de Tukey, en la cual se determinó en qué nivel del factor o interacción esta la significancia; otro indicador a analizar es la barra de la desviación estándar de todos los tratamientos, que es la dispersión de las unidades experimentales, es decir, todos los clones de los sistemas mixto y convencional mostraron mucha dispersión de sus unidades (valor mínimo, máximo y rango), en comparación del sistema ecológico en donde sus unidades tuvieron valores más cercanos a la mediana. En conclusión, con el análisis de Tukey se determinó que el Cd en el suelo estuvo presente en todos los clones estudiados, no hubo algún factor genético o fisiológico que haya intervenido para que este elemento sea menor en algún clon, cerrando la posibilidad de que el contenido de Cd, alto o bajo, sea específico de algún clon; lo que si se vio en los sistemas de siembra en donde las prácticas ecológicas de cierta manera ayudan a reducir los índices de este metal en el suelo.

Figura 13

Prueba de Tukey para el contenido de Cd (ppm) en suelo de “cacao”



Nota. En la barra se muestra la desviación estándar, prueba de Tukey ($p < 0,05$) para el contenido de Cd (ppm) en suelos de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en dos clones estudiados.

3.1.2. Contenido de cadmio (Cd) en hojas

La Tabla 6 muestra el Análisis de Varianza, para el contenido de cadmio (Cd) en hojas en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51. En donde existen diferencias significativas en el modelo, el sistema de siembra y los clones, pero no hubo significancia en la interacción de ambos factores, mostrando una media de 1,71 ppm, con un Coeficiente de Variabilidad (C.V) de 39,73% y un Coeficiente de Determinación (R^2) de 73%, resultados que se encuentran dentro del rango de dispersión aceptable para trabajos realizados en campo según Calzada (1982). En este caso los datos cumplieron el supuesto de normalidad, por lo tanto, no se transformaron.

Tabla 6

Análisis de varianza para el contenido de cadmio en hojas de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Sign.
Modelo	15,24	5	3,05	6,6	0,0036	**
Sistemas de siembra (Factor “A”)	9,89	2	4,94	10,71	0,0021	**
Clones (Factor “B”)	3,16	1	3,16	6,84	0,0226	*
Sistemas de siembra*Clones de “cacao”	2,19	2	1,1	2,37	0,1352	N. S
Error	5,54	12	0,46			
Total	20,78	17	0,01			

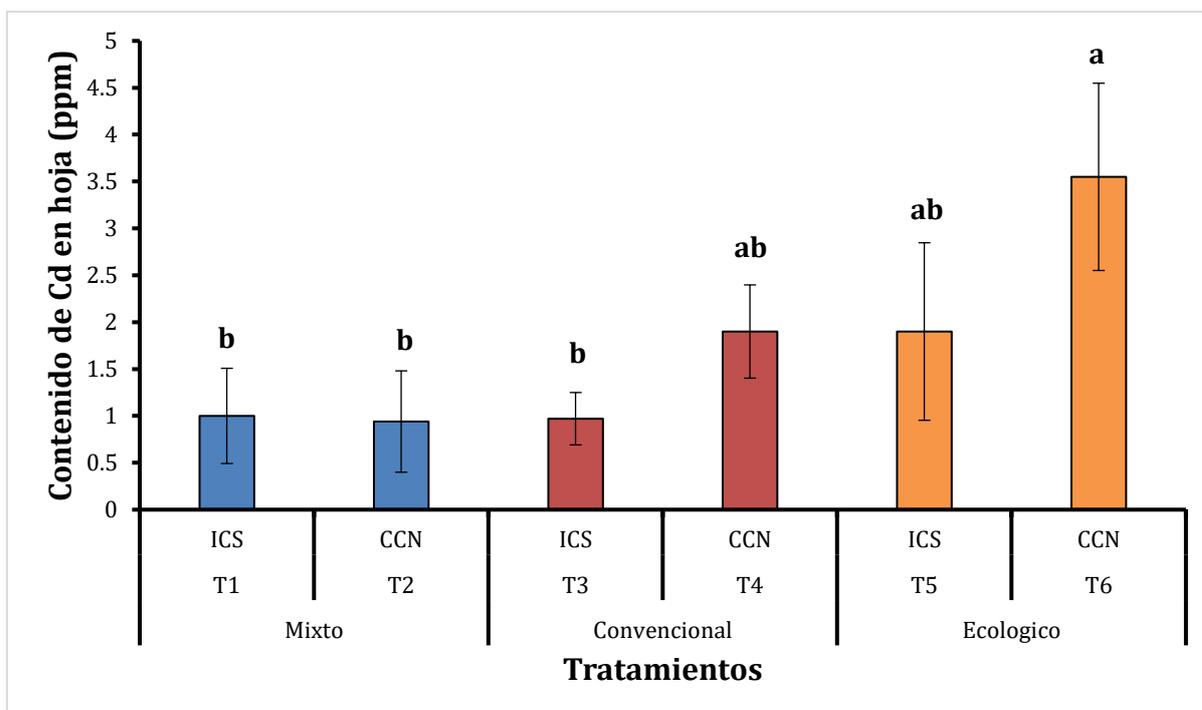
** y *= Significativo N. S= No Significativo

La figura 14 muestra los resultados de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para el contenido de Cd en hojas (ppm), donde el mayor contenido de Cd fue para el clon de CCN-51 con un promedio de 3,54 ppm en el sistema ecológico y su comparación con el clon ICS-95 del cual no hubo diferencia estadística por compartir la misma letra de diferenciación (a), el mismo resultado se vio con el clon CCN-51 pero solo del sistema convencional. Lo importante se dio en los clones del sistema convencional, porque hay diferencia significativa entre sí al presentar letras diferentes (ICS-95 con “b” y CCN-51 con “ab”) y datos de 0,97 ppm (ICS-95) y 1,9 ppm (CCN-51) respectivamente, por esta razón en el ANOVA sale significancia, verificando con la prueba de Tukey que solo es en este sistema de siembra, con estos resultados se podría decir que el clon ICS-95 por algún factor físico, químico o biológico del suelo se está translocando menor cantidad de Cd a las hojas, además de que las muestras fueron tomadas de localidades diferentes entre los clones. En comparación, con los clones del sistema mixto los cuales no hubo diferencia estadística entre ellos, pero si con los demás tratamientos, tuvieron resultados de 1,0 ppm y 0,94 ppm. Analizando el contenido de Cd en hojas, los clones del sistema ecológico fueron superiores en especial el clon CCN-51, sin embargo los dos clones de este sistema tienen la mayor desviación estándar lo que significa que, presentan unidades muestreadas que difieren mucho de la mediana, además, los resultados del ANOVA muestran que, el contenido de Cd en hojas si está dependiendo de un clon (presentándose solo en el sistema convencional) motivo por el cual se debería hacer

una segunda prueba para corroborar estos datos (en caso de salir resultados similares, sería enfoque de otro tipo de análisis más profundo).

Figura 14

Prueba de Tukey para el contenido de Cd (ppm) en hojas de “cacao”



Nota. En la barra se muestra la desviación estándar, prueba de Tukey ($p < 0,05$) para el contenido de Cd (ppm) en hojas de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en dos clones estudiados.

3.1.3. Contenido de cadmio (Cd) en granos

La Tabla 7 muestra el Análisis de Varianza, para el contenido de cadmio (Cd) en granos en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51. En donde existen diferencias significativas en el modelo y el sistema de siembra; sin embargo, no hubo significancia en los clones y en la interacción de ambos factores, mostrando una media de 0,63 ppm, con un Coeficiente de Variabilidad (C.V) de 21,5% y un Coeficiente de Determinación (R^2) de 79%, resultados que se encuentran dentro del rango de dispersión aceptable para trabajos realizados en campo según Calzada (1982). Datos transformados a función Raíz Cuadrada (X).

Tabla 7

Análisis de varianza para el contenido de cadmio en granos de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo

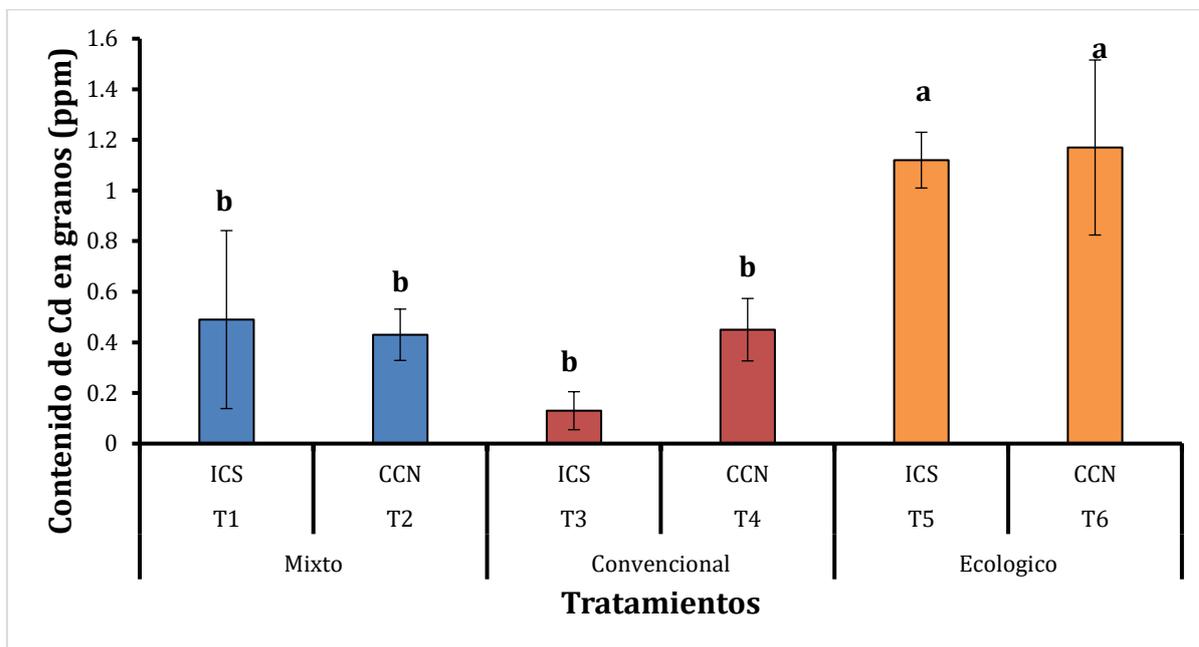
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Sign.
Modelo	1,18	5	0,24	9,3	0,0008	**
Sistemas de siembra (Factor “A”)	1,02	2	0,51	20,18	0,0001	**
Clones (Factor “B”)	0,06	1	0,06	2,25	0,1596	N. S
Sistemas de siembra*Clones de “cacao”	0,1	2	0,05	1,96	0,1838	N. S
Error	0,3	12	0,03			
Total	1,48	17				

** y *= Significativo N. S= No Significativo

La figura 15 muestra los resultados de la prueba de tukey ($p < 0,05$) para el contenido de Cd (ppm) en granos o almendras de “cacao”, donde el mayor contenido de Cd fue para el clon CCN-51 con un promedio de 1,17 ppm, seguido del clon ICS-51 con 1,12 ppm, ambos en el sistema ecológico y sin diferencia estadística entre sí, esto es interesante ya que al comparar con el contenido de este metal en el suelo, estos clones tuvieron los índices mínimos, lo que podría deberse a algún factor del medio circundante u otro tipo. Los demás tratamientos no tuvieron diferencia significativa (misma letra de diferenciación, todos con “b”), lo que responde a la no significancia en el factor clones (corroborado con la prueba de Tukey) y menos en la interacción de ambas variables; sin embargo, si hay significancia en los sistemas de siembra, y es justamente por la diferenciación que se da en el sistema ecológico pero que no está sujeto solo a un tipo de clon. Concluyendo que, el sistema ecológico posee un alto contenido de Cd en las almendras pero que podría deberse solo a algunas unidades muestrales porque tiene una alta desviación estándar (CCN-51), solo en el clon ICS-95 se debería repetir el ensayo para corroborar estos datos.

Figura 15

Prueba de Tukey para el contenido de Cd (ppm) en granos de “cacao”



Nota. En la barra se muestra la desviación estándar, prueba de Tukey ($p < 0,05$) para el contenido de Cd (ppm) en granos de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en dos clones estudiados.

3.2. Colonización micorrízica, micelio y densidad de esporas de HMA en “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51

3.2.1. Colonización micorrízica

La Tabla 8 muestra el Análisis de Varianza, para la colonización micorrízica de raíces de “cacao” en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51. En donde no existen diferencias significativas en ningún factor estudiado, mostrando una media de 58,88 %, con un Coeficiente de Variabilidad (C.V) de 5,55 % y un Coeficiente de Determinación (R^2) de 41 %, resultados que se encuentran dentro del rango de dispersión no aceptable para trabajos realizados en campo según Calzada (1982). Datos transformados a función Raíz Cuadrada (X).

Tabla 8

Análisis de varianza para la colonización micorrízica de raíces de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo

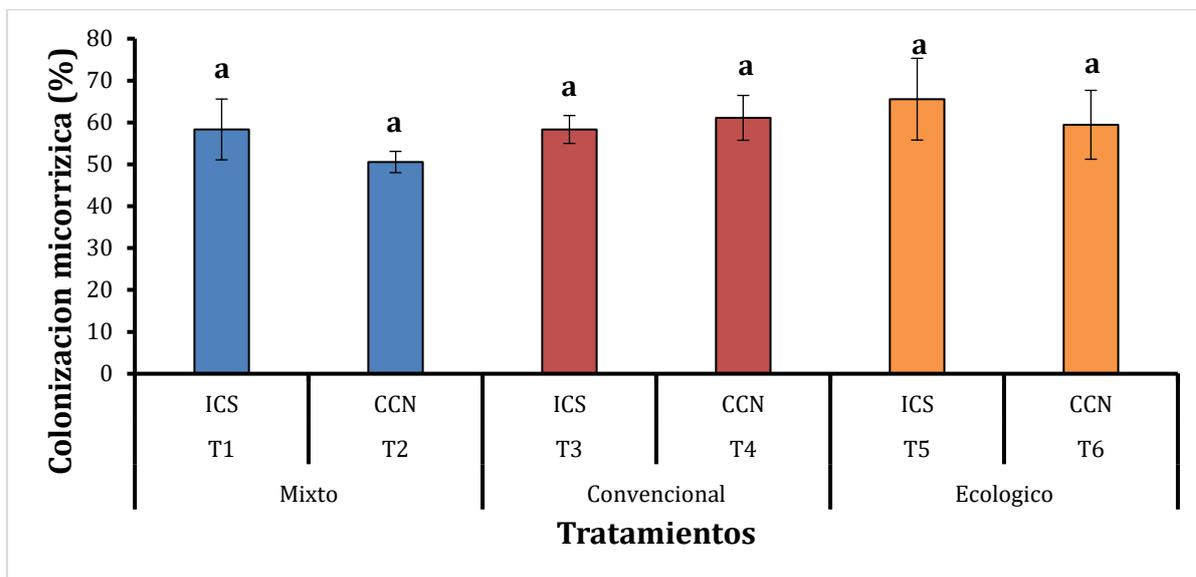
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Sign.
Modelo	1,52	5	0,3	1,69	0,2116	N. S
Sistemas de siembra (Factor “A”)	0,85	2	0,43	2,36	0,1367	N. S
Clones (Factor “B”)	0,26	1	0,26	1,46	0,2499	N. S
Sistemas de siembra*Clones de “cacao”	0,41	2	0,2	1,13	0,3547	N. S
Error	2,17	12	0,18			
Total	3,69	17				

N. S= No Significativo

La Figura 16 muestra los resultados de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la colonización micorrízica (%), en el cual la mayor colonización se presentó en el sistema de siembra ecológico en el clon ICS-95 con un promedio de 65,55 %, sin embargo los demás tratamientos no mostraron significancia (ningún sistema), esto sumado a los resultados del coeficiente de variabilidad (5,55 %) y coeficiente de correlación (41 %) indican que la toma de datos fue oportuna y no hubo algún efecto que intervino durante este proceso, además el 41 % del coeficiente de correlación significa que la colonización micorrízica no influyó en los sistemas de siembra (no hubo diferencias de medias), por lo contrario todo fue semejante. Esto no quiere decir que las micorrizas no intervienen en el proceso fisiológico del suelo, ya que todos los tratamientos estuvieron entre el 50 y 65 % de colonización, resultados que son altos en riqueza biológica y que posiblemente hayan influenciado en mitigar los efectos del Cd en el suelo.

Figura 16

Prueba de Tukey para la colonización micorrízica (%) en plantas de “cacao”



Nota. En la barra se muestra la desviación estándar, prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la colonización micorrízica (%) en plantas de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en dos clones estudiados.

3.2.2. Micelio extraradical

La Tabla 9 muestra el Análisis de Varianza, para la longitud de micelio extraradical (cm) en raíces de “cacao” en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51. En donde existen diferencias significativas en el modelo y el sistema de siembra, pero en los clones y la interacción de ambos factores no tuvieron resultados significativos, mostrando una media de 13,14 cm de longitud de micelio, con un Coeficiente de Variabilidad (C.V) de 18 % y un Coeficiente de Determinación (R^2) de 73 %, resultados que se encuentran dentro del rango de dispersión aceptable para trabajos realizados en campo según Calzada (1982). Datos transformados a función Raíz Cuadrada (X).

Tabla 9

Análisis de varianza para la longitud de micelio extraradical en raíces de “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Sign.
Modelo	12,86	5	2,57	6,52	0,0037	**
Sistemas de siembra (Factor “A”)	12,59	2	6,3	15,96	0,0004	**
Clones (Factor “B”)	0,03	1	0,03	0,07	0,7983	N. S
Sistemas de siembra*Clones de “cacao”	0,25	2	0,12	0,31	0,7372	N. S
Error	4,73	12	0,39			
Total	17,7	17				

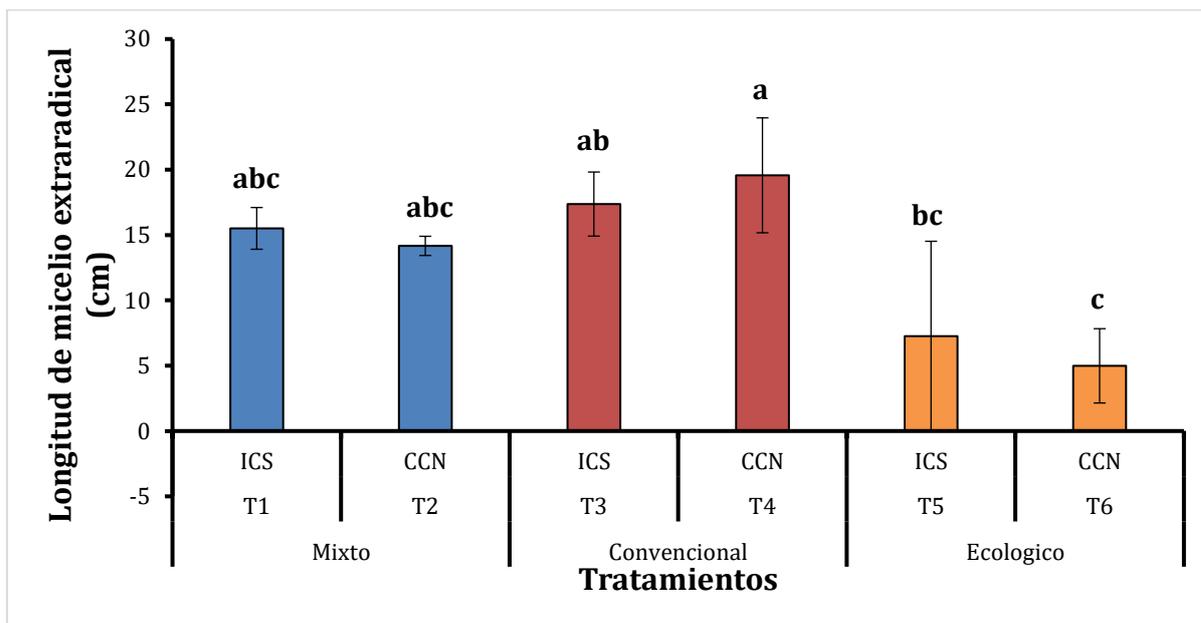
** y *: Significativo N. S= No Significativo

La Figura 17 muestra los resultados de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la longitud de micelio extraradical (cm) de las micorrizas en simbiosis con plantas de “cacao”, el cual la mayor longitud de micelio lo presentó el clon CCN-51 en el sistema convencional con un promedio de 19,57 cm, seguido del clon ICS-95 del mismo sistema con 17,37 cm y el sistema mixto (ambos clones) con 15,51 cm y 14,17 cm respectivamente, pero todos estos tratamientos no se diferenciaron estadísticamente por compartir la misma letra de diferenciación (a), que indica la relatividad o semejanza entre sus medias. Nuevamente se repite el patrón de significancia en el factor sistema de siembra (resultados del ANOVA) que indica la diferencia entre las medias de los tratamientos (dando enfoque al comparar los sistemas mixto y convencional con el ecológico) siendo este último el que mostró menor longitud extraradical del micelio micorrízico respecto a los demás sistemas (ambos clones con 7,26 y 4,99 cm), además de dar entendimiento al indicador evaluado “contenido de Cd en granos de “cacao”, donde el sistema ecológico presentó los mayores índices de este metal y que ahora se puede decir que, las especies micorrízicas presentes en el suelo circundante a estas plantas de “cacao” en donde se realizaron los muestreos no son muy eficaces al momento de la exploración de la solución suelo (por la baja longitud del micelio extraradical encontrado) esto es materia de una futura investigación y repetición de los ensayos en campo; lo que llama la atención en el sistema ecológico es la alta desviación estándar, dado por las unidades dispersas de la mediana (algún valor difiere mucho de los demás, clon ICS-95).

Por estos resultados se cumple la significancia solamente en el sistema de siembra, primero en el ANOVA y luego su verificación con la prueba de Tukey para determinar en qué nivel esta la significancia, cerrando nuevamente la posibilidad que exista diferenciación o especificidad con algún clon.

Figura 17

Prueba de Tukey para la longitud de micelio extraradical (cm)



Nota. En la barra se muestra la desviación estándar, prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la longitud de micelio extraradical (cm) en plantas de “cacao” en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en dos clones estudiados.

3.2.3. Número de esporas

La Tabla 10 muestra el Análisis de Varianza, para el número de esporas de HMA asociados a plantas de “cacao” en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51. En donde no existen diferencias significativas en ningún factor, modelo o interacción de ambos, mostrando una media de 36 esporas de HMA, con un Coeficiente de Variabilidad (C.V) de 20,43 % y un Coeficiente de Determinación (R^2) de 10 %, resultados que solo se encuentra el C. V dentro del rango de dispersión aceptable para trabajos realizados en campo según Calzada (1982). Datos transformados a función Raíz Cuadrada (X).

Tabla 10

Análisis de varianza para el número de esporas de HMA en “cacao” con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51 en condiciones de campo

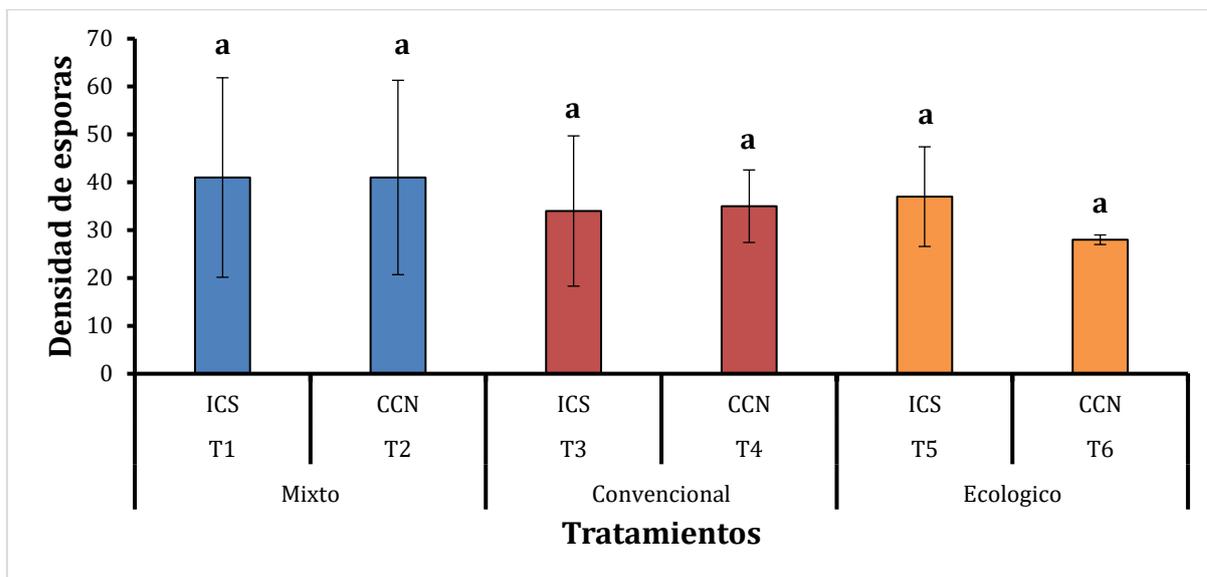
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Sign.
Modelo	2,02	5	0,4	0,28	0,9166	N. S
Sistemas de siembra (Factor “A”)	1,01	2	0,51	0,35	0,7134	N. S
Clones (Factor “B”)	0,12	1	0,12	0,08	0,7786	N. S
Sistemas de siembra*Clones de “cacao”	0,89	2	0,44	0,31	0,7423	N. S
Error	17,46	12	1,46			
Total	19,48	17				

N. S= No Significativo

La Figura 18 muestra los resultados de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para el número de esporas presentes en los suelos de plantas de “cacao”, donde el mayor número lo presentó el sistema de siembra mixto para los clones ICS-95 y CCN-51 con un promedio de 40,66 (41) esporas en cada tratamiento; sin embargo, no tuvieron diferencias significativas entre sus medias, inclusive al comparar con los demás tratamientos, ya que todos estuvieron en un rango de 28 a 41 esporas, es por ello los resultados del ANOVA, en la que, no hubo significancia en ningún factor o interacción. Cabe recalcar que, la toma de muestras es relativa y que, aun siendo estos resultados visiblemente bajos, eso no quiere decir que las especies micorrízicas presentes en el suelo no sean activamente simbióticas y queda demostrado en los indicadores micorrízicos % de colonización y longitud de micelio extraradical, los cuales tienen resultados muy interesantes.

Figura 18

Prueba de Tukey para el número de esporas en suelos de “cacao”



Nota. En la barra se muestra la desviación estándar, prueba de Tukey ($p < 0,05$) para el número de esporas en suelos de “cacao” en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en dos clones estudiados.

3.3. Correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en suelos, con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51

La Tabla 11 muestra la correlación entre los indicadores micorrízicos y los aspectos químicos del suelo en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico de los clones ICS-95 y CCN-51. Se determinó la correlación estadística entre las micorrizas con la presencia de Cd en los tejidos vegetales del “cacao”, para comprobar si existió relación y como estuvo vinculado.

Tabla 11*Correlación entre indicadores micorrízicos y características químicas de suelos*

Variables	Cd en suelo	pH	MO	P	K	N	Arcilla	CIC
Colonización	-0,207	-0,333	0,285	0,322	-0,443	0,238	-0,155	-0,398
Micelio	0,574*	-0,008	-0,384	-0,627*	0,424	-0,435	0,255	0,097
Esporas	-0,016	0,024	0,071	-0,043	0,447	0,129	0,077	0,307

Nota. MO: Materia orgánica, P: fósforo, K: potasio, N: nitrógeno, CIC: capacidad de intercambio catiónico.

*P < 0,05

Asimismo, en la Tabla 12 se muestran los resultados de la regresión que relacionan a los indicadores micorrízicos, con características químicas del suelo en “cacao”, con sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico, en los clones ICS-95 y CCN-51.

Tabla 12*Ecuación de regresión que relacionan indicadores micorrízicos con características químicas del suelo*

Variable	Regresión lineal	R ²	P
Colonización	COL = 70,058 + 14,942MO - 263,552N - 0,263ARC - 0,6CIC	0,438	0,091
Micelio	MIC = 86,071 - 9,701pH + 0,043K - 111,699N	0,638	0,002*
Esporas	ESP = 27,754 - 20,074MO + 0,082K + 443,602N	0,322	0,1317

Nota. MO: Materia orgánica, P: fósforo, K: potasio, N: nitrógeno, ARC: arcilla, CIC: capacidad de intercambio catiónico. *P < 0,05

Los indicadores micorrízicos estuvieron correlacionados con las variables edáficas, ya que el micelio extraradical obtuvo alto nivel de relación hacia el Cd presente en el suelo y el P disponible; asimismo, el mejor modelo significativo para el efecto de las variables edáficas en el tamaño de micelio, incluyó pH, K y N, donde el tamaño de micelio fue afectado negativamente por el incremento de pH y N; sin embargo, estuvo favorecido con el incremento de K. Por otro lado, los mejores modelos, aunque no significativos para el efecto de las variables edáficas sobre la colonización micorrízica y la cantidad de esporas, incluyeron MO, N, ARC y CIC y MO, K y N, respectivamente, la relación positiva del N

con las esporas podría deberse a alguna especie que este interactuando con este elemento para su aumento, aspecto que es muy diferente entre las especies micorrízicas y que no está ligado a la colonización o longitud de micelio, ya que, la agresividad de una especie altamente simbiótica no depende del número de esporas.

3.4. Correlación de las micorrizas arbusculares y el contenido de cadmio en hojas y granos de “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en clones ICS-95 y CCN-51

La Tabla 13 muestra la correlación entre las cantidades de Cd presente en hojas y granos de “cacao” con las micorrizas arbusculares, en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico de los clones ICS-95 y CCN-51. Se comparó la correlación estadística entre el contenido de Cd en las plantas de “cacao” interactuando con las micorrizas.

Tabla 13

Correlación entre la cantidad de Cd (ppm) en la planta e indicadores micorrízicos

Variables	Colonización	Micelio	Esporas
Cd en hojas	0,212	-0,632*	-0,341
Cd en granos	0,437	-0,782*	-0,221

Nota. *P< 0,05 correlación entre la cantidad de Cd en la planta e indicadores micorrízicos

Asimismo, en la Tabla 14 se muestran las ecuaciones de regresión que relacionan la cantidad de Cd (ppm) en la planta de “cacao”, con los indicadores micorrízicos, en sistemas agroforestales mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51.

Tabla 14

Ecuaciones de regresión para la cantidad de Cd (ppm) en la planta de “cacao” con los indicadores micorrízicos

Variable	Regresión lineal	R²	P
Cd en hojas	$CDH = 3,163 - 0.111MIC$	0,400	0,004*
Cd en granos	$CDG = -0,160 - 0,053MIC + 0,025COL$	0,786	<0,001*

Nota. MIC: Micelio, COL: Colonización. *P< 0,05

Las variables concernientes al contenido de Cd en la planta, estuvieron correlacionadas con los indicadores micorrízicos, en el cual este metal presente en las hojas y granos de “cacao” quedaron altamente relacionados con la longitud de micelio extraradical de las micorrizas; asimismo, el mejor modelo significativo para la cantidad de Cd en hojas, solo estuvo relacionada a la presencia del micelio extraradical (MIC); además, la cantidad de Cd en hojas se vio afectada negativamente por el incremento en MIC. Por otra parte, el mejor modelo significativo para la cantidad de Cd en granos incluyó al MIC y colonización micorrízica (COL), y la cantidad de Cd en granos estuvo positivamente correlacionada con COL, mostrando una reducción cuando el tamaño de MIC aumentaba, esto podría deberse a especies micorrízicas que estuvieran colonizando las raíces de “cacao” y en el proceso de la simbiosis estén absorbiendo este metal.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Contenido de cadmio (Cd) en suelo, hojas y granos en “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51

Las evaluaciones realizadas para determinar el contenido de cadmio (Cd) en el suelo, hojas y granos de “cacao”, en sistemas agroforestales mixtos, convencional y ecológico, mostraron distintos resultados. Describiendo que, en los resultados del contenido de Cd en hojas de “cacao” reportaron altos contenidos de este metal en todos los sistemas de siembra indistintamente el clon de “cacao”, detallando que en el clon ICS-95 tuvo 1,90 ppm de Cd (ecológico) y para el clon CCN-51 un contenido de 3,55 ppm (ecológico) (Figura 14); todos estos datos, estuvieron por encima de los límites máximos permisibles (LMP), ya que superaron el 1,4 ppm emitidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], y la Organización Mundial de la Salud [OMS] (2019), además, esto está también descrito en las “Directivas del Codex Alimentarius” sobre normas alimentarias de contaminantes en los alimentos, un anteproyecto de código de prácticas para la prevención y reducción de la contaminación por cadmio en los granos de “cacao” (FAO/WHO, 2020), y tratándose de un sistema sin o con poca intervención con enmiendas o insumos químicos para una mejor producción, lo que conlleva a analizar los factores que podrían estar favoreciendo para la absorción de Cd del suelo.

Uno de ellos se da naturalmente con la meteorización de la roca madre, aunque esto depende del tipo de roca, la lixiviación que se da en este proceso (Wen *et al.* 2020), los carbonatos presentes, los componentes solubles como la calcita y la dolomita (Chi y Yan, 2007) todo esto influye para una liberación natural de este metal, por otro lado los factores edáficos como pH, arcillas, la materia orgánica o el zinc (Zn) un elemento competidor que influye en la disponibilidad de Cd hacia las plantas podrían estar favoreciendo (Chavez *et al.* 2015) además de que este metal es muy móvil en el suelo, lo que facilita su absorción por las plantas (Nies, 2003), todos estos factores de una manera u otra son relevantes al momento

de analizar el por qué la presencia alta de Cd en las hojas de “cacao” que se estudiaron, sin pasar en alto los antecedentes de las parcelas, ya que la adición de estiércol de animales de granja, residuos orgánicos y otros materiales también influyen en la disponibilidad de Cd en el suelo y su absorción radicular (Rankin *et al.* 2005; Zhang *et al.* 2012), por más ecológicos que puedan ser.

En los resultados del Cd en granos de “cacao”, nuevamente fueron superiores en el sistema ecológico tanto para clones ICS-95 (1,12 ppm) como para clones CCN-51 (1,17 ppm), sobre esto, Clemens *et al.* (2013), mencionan que, podría haber una variación sustancial en la absorción de Cd entre diferentes cultivares de “cacao”, algo que también se da en otros cultivos, y no solamente sería la variedad sino en el sistema mismo, ya que, el manejo puede no solo afectar la disponibilidad de Cd en el suelo, sino también el contenido total de Cd en el suelo a través de insumos con la aplicación de fertilizantes minerales y esto ser transportado hacia los granos de “cacao” por la misma fisiología de las plantas (Rankin *et al.* 2005; Zhang *et al.* 2012). Resultados similares obtuvieron Chavez *et al.* (2015), quienes en su evaluación sobre la concentración de Cd en los granos de “cacao”, encontraron valores que oscilaron entre 0,02 y 3,0 mg.kg⁻¹ (ppm) y un valor promedio de 0,94 mg.kg⁻¹ (ppm), asimismo, en las muestras de suelo tomadas a diversas profundidades, encontraron valores de Cd con variaciones de 0,88 a 2,45 mg.kg⁻¹ (ppm) y de 0,06 a 2,59 mg.kg⁻¹ (ppm), con un promedio de 1,54 y 0,85 mg.kg⁻¹ (ppm).

Además, Mendoza *et al.* (2021) en su investigación realizada sobre el Cd presente en plantaciones de *Theobroma Cacao* L., encontraron una concentración de este metal de 2,09 ppm para el suelo, demostrando que la presencia y disponibilidad del Cd, estuvo favorecida por la acidez del suelo. Rosales *et al.* (2020) en su investigación sobre la determinación de los niveles de metales pesados, encontraron en el grano de “cacao” una concentración promedio de Cd de 0,96 mg.kg⁻¹ (ppm), y para las muestras de suelo, la concentración fue de 1,63 mg.kg⁻¹ (ppm), confirmando de esta manera, que existió una distribución del metal por todos los tejidos de las plantas de “cacao” y en los suelos de las plantaciones, tanto a nivel de unidad productiva y a nivel de variedad, donde aproximadamente entre el 70 y 80 % del Cd fue retenido en las raíces y el resto fue trasladado a otras partes de los tejidos

de las plantas. Asimismo, Gramlich *et al.* (2016), encontraron valores más altos en las hojas ($0,95 \pm 0,05 \text{ mg.kg}^{-1}$) (ppm) de “cacao” que en las semillas ($0,54 \pm 0,04 \text{ mg.kg}^{-1}$) (ppm), resultados similares a lo obtenido en esta investigación.

Asimismo, los clones de “cacao” influyeron en los contenidos de Cd, pues el genotipo CCN-51 mostró un incremento en el contenido del metal para el sistema de siembra de “cacao” ecológico, tanto en hojas como en granos; del mismo modo, similar resultado reportó Arévalo *et al.* (2017) donde mostraron que el Cd en las hojas y los granos en parcelas con el clon CCN-51 ($0,09 \text{ mg.kg}^{-1}$) (ppm), fueron más bajos que las muestras con una combinación de CCN-51 e ICS-95, los cuales superaron el valor tolerable ($3,0 \text{ mg.kg}^{-1}$) (ppm). La causa de la mayor presencia de Cd en parcelas de “cacao” ecológico, podría deberse al uso de compost preparados en base a los mismos residuos de “cacao” con estiércol de gallinaza, esto sumado a la abundancia micorrízica generan mayor movilidad del metal en suelos ácidos, crecimiento más rápido de la planta; traducándose en una mayor absorción de Cd por el micelio del suelo (McLaughlin y Singh 1995). Asimismo, los biofertilizantes aplicados en los campos de “cacao” incrementan la concentración de Cd en las hojas y tallos (Ramtahal *et al.* 2012). Además, para otras especies como el arroz, existe una mayor disimilitud en la formación de Cd dependiendo del tipo de variedad, según lo reportado por Liu *et al.* (2016). Además, muchos estudios destacaron que la disponibilidad del Cd para las plantas de “cacao”, dependieron de factores predominantes como el pH del suelo, el Cd almacenado de forma natural en el suelo y, por último, el lugar donde se encuentran los árboles de “cacao”, haciendo referencia a la zona geográfica (Chávez *et al.* 2015).

4.2. Colonización micorrízica, micelio y densidad de esporas de HMA en “cacao” con un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS - 95 y CCN - 51

Según los resultados obtenidos sobre la colonización micorrízica, micelio y densidad de esporas de HMA, no se encontraron diferencias significativas en los parámetros de micorrización colonización y densidad de esporas, solo se obtuvo significancia en el micelio extraradical. Con respecto a los análisis de suelos (Apéndice 3), de cada muestra proveniente de los sistemas agroforestales, las cuales tienen texturas franco arcilloso, arcilloso y

arcilloso, respectivamente. La materia orgánica para la muestra de Rioja fue aquella con mayor porcentaje (3,89 %), así como su concentración de Nitrógeno (0,18 %) a comparación de la muestra procedente de Mariscal Cáceres debido a sus concentraciones bajas de materia orgánica (2,33) y Nitrógeno (0,10 %). Arévalo *et al.* (2016), hace mención para caracterización de suelos en Mariscal Cáceres con un promedio de 2,56 % al momento de evaluar concentraciones de metales pesados en cultivos de “cacao”; mientras que Bueno (2016), menciona como Plaster (2005) describe a la provincia de Rioja que se destaca por sus suelos con alto contenido de materia orgánica y, correspondientemente, su contenido de nitrógeno al estudiar la asimilación de carbono en suelos con plantaciones de café y eucalipto usando sistemas agroforestales.

Estudios realizados por Beltrán *et al.* (2012) acerca del comportamiento eco-fisiológico de cuatro clones de “cacao” injertados sobre patrones de IMC-67, demostraron que el genotipo CCN-51 fue el que presentó los mayores promedios en las variables morfo-fisiológicas evaluadas, lo que demostró la alta afinidad y compatibilidad que existió entre el patrón – injerto, donde la semejanza influyó directamente en la formación de raíces de la planta, debido al intercambio nutricional que se produjo entre patrón e injerto, y una mayor colonización micorrízica del clon CCN-51. Los cambios en la fertilidad del suelo con fertilizantes minerales o abonamiento orgánico, afectan marcadamente la actividad de la población micorrízica del suelo, en términos de la calidad de la raíz colonizada y el número de esporas producidas (Rodríguez, 2017). Lori *et al.* (2022), realizó un ensayo comparativo en el pie de monte oriental de los Andes Bolivianos al evaluar riqueza fúngica y microbiana en menor proporción usando sistemas de monocultivo y sistemas agroforestales con bajo contenido orgánico y convencional para cada sistema donde, la mayor diversidad se apreció en sistemas agroforestales sucesivos a comparación de monocultivos convencionales (donde hubo el mayor índice de ausencia de diversidad) debido al uso de fertilizantes.

Todas las muestras de suelo asociados a los dos clones de “cacao” (ICS-95 y CCN-51) tuvieron la presencia de esporas de HMA. Aparentemente no se apreció ninguna especificidad estricta en la asociación de micorrizas arbusculares (Harley y Smith, 1983), es decir, cualquiera de los dos clones como planta hospedera puede establecer simbiosis con

las especies de HMA presentes (Cuenca *et al.* 2007). Sin embargo, diversos estudios mostraron que la biodiversidad de HMA en plantas de similares características, pueden presentar variaciones (Santos, 2007; Sykorová *et al.* 2007). Además de ello, se conoce que las plantas de “cacao” son altamente micotróficas (Latacela *et al.* 2017), esto va conllevar a una colonización radicular de los HMA que estén presentes en el medio suelo indistintamente el manejo agrícola que se esté haciendo (Sandoval-Pineda, 2020), lo que indica que la simbiosis ejerce un papel importante en la nutrición del “cacao” y el ciclo de nutrientes del agrosistema. En este estudio se comprobó que la colonización micorrízica y número de esporas no mostró dependencia de los clones evaluados, tanto a nivel convencional, ecológico y mixto, esto se explica con la presencia de especies de HMA que tienen una mayor capacidad de realizar una simbiosis con las plantas de “cacao” (sin importar el tipo de clon), como son las Glomeromycota (Iglesias *et al.* 2011) a excepción del indicador micelio extraradical quien tuvo resultados muy interesantes y que podría deberse a la población de especies HMA presentes en estos suelos. Los HMA acumulan metales pesados como cadmio (Cd), plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu) en las raíces de las plantas, minimizando así su traslocación hacia el fruto (Hristozkova *et al.* 2017), o también pueden inmovilizar estos elementos pesados en la rizosfera mediante la producción de proteínas como la glomalina (Ferro *et al.* 2016). Este proceso, se conoce como fitoestabilización y con esto se disminuye la biodisponibilidad de estos elementos y su toxicidad (Janeeshma y Puthur, 2020).

4.3. Correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en suelos en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS-95 y CCN-51

Las variables micorrízicas estuvieron correlacionadas con las variables edáficas (Tabla 11) y el mejor modelo significativo para el efecto de las variables edáficas en el tamaño de micelio incluyó pH, K y N, donde el tamaño de micelio se vio afectado negativamente por el incremento de pH y N. Así mismo, el grado de correlación entre la presencia del Cd ante la formación de micelio no tiene diferencia significativa en las hojas al contar con un índice de correlación bajo e inverso (-0,632), sin embargo, en los granos este metal si tuvo diferencia significativa ya que tiene un índice de -0,782 (inverso negativo) lo que significa que a mayor contenido de Cd en los granos menor expansión de micelio de los HMA se

encontró respectivamente, en cambio con la colonización en ambos indicadores (Cd en hojas y granos) no hubo diferencias significativas, lo que ciertamente se relaciona con el micelio, ya que al no haber expansión micelial no va haber colonización radicular de las plantas de “cacao”.

Panwar y Tarafdar (2006) en su investigación realizada, encontraron una correlación positiva (0,85), donde el pH presentó una alta significancia ($p < 0,01$) para la población de esporas; no obstante, Guo *et al.* (2012) encontraron que la correlación del pH para la densidad de esporas fue baja con 0,15; asimismo, la correlación en la misma variable para la colonización no fue relevante, ya que el valor obtenido fue de 0,1, confirmando de esta manera, que para la correlación de micelio, el valor fue de -0,068 y arbusculos con 0,24, cuyo resultado fue bajo. Estos datos demostraron que existió diversos factores que intervinieron en la germinación de las esporas, siendo el pH el que estuvo más relacionado con la densidad, más no con la colonización (Koltai y Kapulnik, 2010). Guo *et al.* (2012) encontraron una correlación con alta significancia entre el carbono orgánico y la población de esporas (0,94), estos valores se debieron al contenido alto de carbono, el cual incrementó la presencia de la materia orgánica, resultando en una buena retención de humedad, favoreciendo al desarrollo de las micorrizas (Panwar y Tarafdar, 2006).

El porcentaje de materia orgánica fue un factor considerable para la correlación, debido a que esta muestra una estimación para el carbono total; asimismo, el carbono es un recurso vital para las micorrizas (Varma, 2008); además, las micorrizas necesitan de fotosintatos de la planta y dentro de ello está el carbono para su asimilación y desarrollo (Smith y Read, 2008); por lo tanto, existe una relación directa de carbono con la sobrevivencia de micorrizas, pues los hospedantes o plantas son necesarios durante la fase inicial de crecimiento (Varma, 2008), proporcionado una mejor colonización.

4.4. Correlación de las micorrizas arbusculares y contenidos de cadmio (Cd) en hojas y granos de “cacao” en un sistema agroforestal mixto, convencional y ecológico en los clones ICS- 95 y CCN- 51

Las variables concernientes con la absorción de Cd en la planta, estuvieron correlacionadas con las variables micorrízicas (Tabla 13) y el mejor modelo significativo para la cantidad de Cd en hojas incluyó el micelio, donde la cantidad de este metal en hojas se vio afectada negativamente por el incremento de dichas variables. Por otra parte, el mejor modelo significativo para la cantidad de Cd en granos incluyó la colonización micorrízica, micelio y número de esporas; asimismo, el contenido de Cd en hojas estuvo positivamente correlacionada con la colonización.

La presencia de Cd puede modificar la formación de la comunidad, al eliminar especies más sensibles y beneficiar a los de mayor adaptación (Schneider *et al.*, 2016), limitar la capacidad que cumplen las raíces para tomar los nutrientes del suelo e incluso puede aumentar la absorción de contaminantes (Weissenhorn *et al.*, 1995). Sin embargo, algunas especies de HMA han desarrollado adaptaciones fisiológicas y características genéticas que les permiten sobrevivir en diversas condiciones ambientales; la mayoría de los estreses abióticos, incluidos los metales pesados y elementos tóxicos contenidos en los suelos, pueden reducir la colonización de raíces. Por otra parte, Lenoir *et al.* (2016) demostró que el estrés abiótico puede inhibir la germinación de las esporas y evitar que estas infecten una raíz hospedadora adecuada o interrumpen el proceso de colonización después del contacto con el hospedador.

Una de las ventajas importantes de los HMA, radica que estos pueden disminuir la concentración de Cd de la planta (Chen *et al.* 2004; Redon *et al.* 2008). Sin embargo, otros también han informado que la inoculación de micorrizas aumentó (Yu *et al.* 2005) o no tuvo un efecto significativo (Guo *et al.* 1996) en las deposiciones de Cd, tanto en las hojas como en las raíces. Weissenhorn *et al.* (1995) determinaron que la influencia de la HMA en la absorción de metales de las plantas varía según las condiciones de crecimiento de la planta, el socio fúngico de la HMA, las concentraciones de metales y el pH del suelo. Asimismo, las micorrizas han demostrado que pueden adaptarse en diferentes escenarios de condiciones

extremas (Weissenhorn *et al.*, 1993). En el presente caso, un suelo naturalmente enriquecido con Cd, genera situaciones de estrés persistentes a todas las especies y solamente aquellas que pueden resistir, sobreviven debido a la adaptabilidad (Millar y Bennett, 2016).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Se encontró mayor contenido de Cd en suelos para el sistema convencional clon de “cacao” ICS-95 con un promedio de 0,39 ppm, donde el sistema de siembra ecológico de los clones CCN-51 y ICS- 95 fue el que mostró el menor contenido con 0,1 ppm. Asimismo, el mayor contenido de Cd en hojas fue en el sistema ecológico para el clon de “cacao” CCN-51 con un promedio de 3,55 ppm; el menor contenido lo presentó el sistema de siembra mixto del clon CCN-51 con 0,94 ppm. Finalmente, respecto al Cd en granos el mayor contenido fue para el sistema ecológico del clon de “cacao” CCN-51, con un promedio de 1,17 ppm y el menor contenido de Cd se presentó en el sistema de siembra de “cacao” convencional del clon ICS-95 con un promedio de 0,13 ppm.
2. La mayor colonización micorrízica lo presentó el sistema de siembra de “cacao” ecológico en el clon ICS-95, con un promedio de 65,55 %; asimismo, para el clon CCN-51, el mayor porcentaje de colonización lo mostró el sistema convencional con 61,10 %; sin embargo, la mayor longitud de micelio extraradical lo presentó el sistema de siembra de “cacao” convencional en el clon de “cacao” CCN-51, con un promedio de 19,57 cm y el mayor número de esporas lo presentó el sistema de siembra mixto para los clones ICS-95 y CCN-51 con un promedio de 40,66 esporas.
3. El Cd en el suelo con plantas de “cacao” indica haber una correlación inversa negativa (-0,627) con respecto al desarrollo del micelio extraradical sobre el fósforo, indicando que el micelio va aumentando su desarrollo cuando la concentración de este elemento va disminuyendo, lo cual es una característica propia de los HMA a la falta del fósforo en el suelo.
4. La presencia de Cd analizadas tanto en hojas como en granos de “cacao” tuvieron un grado de correlación negativo contraria (-0,632 y -0,782) con proyección inversa en el desarrollo del micelio bajo la presencia de este metal pesado. Del mismo modo, la

concentración de Cd va variando inversamente al crecimiento del micelio a medida que este último se va desarrollando. Por otro lado, al analizar la concentración de Cd para colonización de HMA tanto en hojas como en granos se puede afirmar que, el Cd influye en el desarrollo de la simbiosis micorrízica (0,212 en hojas y 0,437 en granos).

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios de la correlación del Cd presente en los suelos y granos de “cacao” con especies micorrízicas identificadas que podrían hacerse por caracterización molecular o caracterización morfológica.
2. Hacer un diagnóstico en las parcelas de “cacao” sobre la diversidad de especies agroforestales y su posible fitorremediación que podrían tener estos árboles en relación a la absorción del Cd en los sistemas de siembra de “cacao”.
3. Realizar estudios de los contenidos de Cd en fertilizantes fosfatados y fertilizantes orgánicos, toda vez que existe la aplicación de estos productos y por lo tanto se estaría introduciendo el Cd en los suelos de fincas de “cacao”.
4. Ampliar la red de muestreos de suelos para abarcar toda la diversidad posible de especies de hongos micorrízicos y su correlación con la caracterización física y química de los suelos en las diferentes provincias de la región San Martín.

REFERENCIAS

- Abada, M., Zekeng, J., Mala, W., Fobane, J., Djomo, C., Ngavounsia, T., Nyako, C., Florent, E. y Tamanjong, Y. (2016). The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central región of Cameroon [El papel de los sistemas agroforestales de cacao en la conservación de la diversidad de árboles forestales en la región central de Camerún]. *Agroforestry systems*, 90(4), 577-590.
- Acosta, S. y Pozo, P. (2013). Determinación de cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao*) de cinco fincas ubicadas en la vía santo domingo-esmeraldas, mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. *Infoanalítica*, 1(1), 69-82. ISSN: 2477-8788.
- Aguirre, W., Fischer, G. y Miranda, D. (2011). Tolerancia a metales pesados a través del uso de micorrizas arbusculares en plantas cultivadas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 141-154.
- Alva, J. (2019). *Producción masiva de hongos micorrízicos arbusculares utilizando plantas trampa e inóculo de suelo rizosférico de café proveniente de diferentes altitudes de San Martín* [Tesis de grado, Universidad Nacional De San Martín]. Repositorio UNSM.
<https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3587/AGRONOMIA%20-%20Jessica%20de%20Fatima%20Alva%20P%20c3%a9rez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Antoine, J. y Hoo Fung, L. y Grant, C. (2017). Assessment of the potencial health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica [Evaluación de los riesgos potenciales para la salud asociados con el contenido de aluminio, arsénico, cadmio y plomo en frutas y vegetales seleccionados cultivados en Jamaica]. *Toxicology Reports*, 4, 181-187.
<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.03.006>
- Araujo, T., Da Silva, K., Duarte, G., Curcino, A., Stürmer, S. y Oliveira, P. (2019). Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Agroforestry, Conventional Plantations and Native Forests in Roraima State, Northern Brazil [Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares en agrosilvicultura, plantaciones convencionales y bosques nativos en el estado de Roraima, norte de Brasil]. *Journal of Agricultural Science*. 11(14), 282-290. DOI: 10.5539 / jas.v11n14p282.
- Arcos, A. (2003). Distribución de la asociación micorrízico arbuscular en ecosistemas naturales e intervenidos. *Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del Trapecio Amazónico*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.

- Arévalo, E., Arévalo, C., Baligar, V., y He, Z. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru [Acumulación de metales pesados en hojas y granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las principales regiones cacaoteras del Perú]. *Sci Total Environ*, 605-606,792-800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Arévalo, E., Obando, M., Zúñiga, L., Arévalo, C., 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>
- 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>
- Bautista, F., Rivas, H., Durán, C. y Palacio, G. (1998). Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. Scielo. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n36/n36a3.pdf>
- Bedini S., Turrini, A., Rigo, C., Argese, E., y Giovannetti, M. (2010). Molecular characterization and glomalin production of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing a heavy metal polluted ash disposal island, downtown Venice [Caracterización molecular y producción de glomalina de hongos micorrízicos arbusculares que colonizan una isla de eliminación de cenizas contaminada con metales pesados, en el centro de Venecia]. *Soil Biol. Biochem.* 42, 758-765. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.010>
- Beltrán, J., y Córdoba, R. (2012). *Comportamiento ecofisiológico de cuatro clones de cacao (Theobroma cacao L.) propagados mediante tres métodos de injertación en el Curdn en Armero- Guayabal, Tolima* [Tesis de grado, Universidad del Tolima]. Repositorio UT. <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/1049/1/RIUT-FAA-spa-2014-Comportamiento%20Ecofisiol%20c3%b3gico%20de%20cuatro%20clones%20de%20cacao%20%28Theobroma%20cacao%29%20propagados%20mediante%20tres%20m%20c3%a9todos%20de%20injertaci%20c3%b3n%20en%20el%20CURDN%20en%20Armero%20Guayabal%20Tolima.pdf>
- Bolívar, H. (2011). Metodologías e indicadores de evaluación de sistemas agrícolas hacia el desarrollo sostenible. CICAG. Vol. 8, N° 1. Zulia: Universidad Central de Venezuela. 1-18.

- Bonomelli, C., Bonilla, C., y Valenzuela, A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(10), 1179-1186. <https://www.scielo.br/j/pab/a/dBv7FZxQWJBM4MnpwtfSt8M/?format=pdf&lang=es>
- Bueno, S. (2016). Movimiento del carbono y nitrógeno y captura del CO₂ en cinco suelos con vegetación forestal, Agroforestería y Área degradada en la provincia de Rioja-San Martín. https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/161/Bueno_Sychelles_tesis_bachiller_2016.pdf?sequence=1
- Calvo, P., Reymundo, L., y Zúñiga, D. (2008). Estudio de las poblaciones microbianas de la Rizosfera del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en zonas altoandinas. *Ecología Aplicada*, 7(1-2): 141-148. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v7n1-2/a17v7n1-2.pdf>
- Calzada, B. J. (1982). Métodos estadísticos para la investigación. Lima. 644 pp.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación (2009). *Calidad de Cacao en Centroamérica. Costa Rica: CATIE*. ISBN: 978-9977-57-554-4
- Ceroni, M. (2010). ¿Investigación básica, aplicada o sólo investigación?. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. Perú [online]. 2010, vol.76, n.1, pp.5-6. ISSN 1810-634X
- Cervantes, C., Brown, J., Schnell, R., Phillips, W., Takrama, J., y Motamayor, J. (2006). Combining ability for disease resistance, yield, and horticultural traits of cacao (*Theobroma cacao* L.) clones [Capacidad combinada de resistencia a enfermedades, rendimiento y características hortícolas de clones de cacao (*Theobroma cacao* L.)]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 131(2): 231-241. <https://doi.org/10.21273/JASHS.131.2.231>
- Chávez, E., He, Z., Stoffella, P., Mylavarapu, R., Li, Y., Moyano, B., y Baligar, V. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador [Concentración de cadmio en granos de cacao y su relación con el cadmio del suelo en el sur de Ecuador]. *Science of The Total Environment*, 533, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- Chen, BD., Liu Y., Shen, H., Li, XL., y Christie, P. (2004). Uptake of cadmium from an experimentally contaminated calcareous soil by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea*

mays L.) [Absorción de cadmio de un suelo calcáreo contaminado experimentalmente por micorrizas de maíz arbuscular (*Zea mays* L.)]. *Mycorrhiza*, 14, 347–354. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0281-2>

Chen, J.; Yan, Z. y Li, X. (2014). Effect of methyl jasmonate on cadmium uptake and antioxidative capacity in *Kandelia obovate* seedlings under cadmium stress [Efecto del jasmonato de metilo sobre la absorción de cadmio y la capacidad antioxidante en plántulas obovadas de *Kandelia* bajo estrés por cadmio]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.022>

Chi, Q.H. y Yan, M.C. (2007). Abundance of Elements in Applied Geochemistry [Abundancia de elementos en geoquímica aplicada]. *Geological Publishing House, Beijing (in Chinese)*.

Clemens, S., Aarts, M.G.M., Thomine, S. y Verbruggen, N. (2013). Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning [La ciencia de las plantas: la clave para prevenir el envenenamiento lento por cadmio]. *Trends in Plant Science*. 18, 92–99.

Cline, L., y Zak, D. (2015). Soil microbial communities are shaped by plant-driven changes in resource availability during secondary succession [Las comunidades microbianas del suelo están formadas por cambios en la disponibilidad de recursos impulsados por las plantas durante la sucesión secundaria]. *Ecology*, 96(12): 3374-3385. <https://doi.org/10.1890/15-0184.1>

Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z., y Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia*, 32(1): 23-29. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442007000100006&script=sci_arttext

Di Rienzo, J. A. F., Casanoves, M. G., Balzarini, L., Gonzalez, M., Tablada, Y., y Robledo, C. W. (2019). “InfoStat.” Universidad Nacional de Córdoba.

Eriksson, J., Oborn, I., Jansson, G., y Andersson, A. (1996). Factors influencing Cd-content in crops. Results from Swedish field investigations [Factores que influyen en el contenido de Cd en los cultivos. Resultados de las investigaciones de campo suecas]. *Swedish Journal Agricultural Research*, 26(3): 125-133. https://www.researchgate.net/profile/IngridOborn/publication/259825147_Factors_Influencing_CdContent_in_Crops_Results_from_Swedish_field_investigations/link/s/55a67a9808ae51639c572442/Factors-Influencing-Cd-Content-in-Crops-Results-from-Swedish-field-investigations.pdf

- Enríquez, G., (1985). Centro Agronómico tropical de investigación y enseñanza. 240 p, 23cm (Serie materiales de enseñanza/ centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. N° 22. ISBN: 9977-951-52-7
- FAO/WHO, (2020). Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias comité del codex sobre contaminantes de los alimentos. Anteproyecto de código de prácticas para la prevención y reducción de la contaminación por cadmio en los granos de cacao.
- Fauziah, C., Rozita, O., Zauyah, S., Anuar, A., y Shamshuddin, J. (2001). Heavy metals content in soils of peninsular Malaysia grown with cocoa and cocoa tissues [Contenido de metales pesados en suelos de Malasia peninsular cultivados con cacao y tejidos de cacao]. *Malaysia Journal Soil Science*, 5, 47-58.
- Ferrol, N.; Tamayo, E. y Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: From mechanisms to biotechnological applications [La paradoja de los metales pesados en las micorrizas arbusculares: de los mecanismos a las aplicaciones biotecnológicas]. *Journal of Experimental Botany*. 67, 6253–6265.
- Florida, N. (2021). Cadmio en suelos y granos de cacao de origen peruano y sudamericano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(2): 9499-9515. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>
- Florida, R., Paucar, H., Salinas, J., Severino, S., Mamani, E. y Torres, J. (2019). Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(4): 264-273. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.503>
- García, L. (2014). *Catálogo de cultivares de cacao del Perú* (2° Reimpresión). Ministerio de Agricultura y Riego - Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas. https://issuu.com/riicchperu/docs/cultivaresdecacaoluisgarcia_segund/57
- Gattinger, A., Müller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialaba, N., y Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming [Reservas mejoradas de carbono en la parte superior del suelo bajo la agricultura orgánica]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44), 18226–18231. <https://sci-hub.hkvisa.net/10.1073/pnas.1209429109>
- Geisen, S., Wall, D. H. y Van Der Putten, W. H. Challenges and opportunities for soil biodiversity in the anthropocene. *Curr. Biol.* 29, R1036–R1044 (2019).

- Gerdemann, J., y Nicolson, T. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting [Esporas de micorrizas Endogone extraídas del suelo mediante tamizado en húmedo y decantación]. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2): 235–244. <https://srv2.freepaper.me/n/wSnbIbeX1cYJnqGzqgagLA/PDF/3a/3a70a9cecd93997ca1f0deb7db2beb79.pdf>
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros, J., Armengot, L., Schneider, M., y Schulin, R. (2016). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management [Absorción de cadmio por árboles de cacao en sistemas agroforestales y de monocultivo bajo manejo convencional y orgánico]. *Science of The Total Environment*, 580, 677-686, ISSN 0048-9697. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>
- Guo, H., He, X., y Li, Y. (2012). Spatial distribution of arbuscular mycorrhiza and glomalin in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* Kom. In the Otindag sandy land, China [Distribución espacial de micorrizas arbusculares y glomalina en la rizósfera de *Caragana korshinskii* Kom. En la tierra arenosa de Otindag, China]. *African Journal of Microbiology Research*. 6(28): 5745-5753. DOI:10.5897/AJMR11.1560
- Guo, Y., George, E., y Marschner, H. 1996: Contribution of an arbuscular mycorrhizal fungus to the uptake of cadmium and nickel in bean and maize plants [Contribución de un hongo micorrízico arbuscular a la absorción de cadmio y níquel en plantas de frijol y maíz]. *Plant Soil*, 184(2), 195–205. doi:10.1007/bf00010449.
- Harley, J., y Smith, S. (1983). Mycorrhizal symbiosis [simbiosis micorriza]. Academic Press, London, New York. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=186436](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=186436)
- He, Q., y Singh, B. (1994). Crop uptake of cadmium from phosphorus fertilizers: I. Yield and cadmium content [Consumo de cadmio por parte de los cultivos a partir de fertilizantes fosforados: I. Rendimiento y contenido de cadmio]. *Water Air Soil Polish*, 74(3), 251-265.
- Hildebrandt, U., Regvar, M., y Bothe, H. (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance [Tolerancia a micorrizas arbusculares y metales pesados]. *Phytochemistry*, 68(1), 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.023>
- Hristozkova, M.; Geneva, M.; Stancheva, I.; Iliev, I. y Azcon-Aguilar, C. (2017). Symbiotic association between golden berry (*Physalis peruviana*) and arbuscular mycorrhizal fungi in heavy metal-contaminated soil [Asociación simbiótica entre uchuva

(*Physalis peruviana*) y hongos micorrízicos arbusculares en suelos contaminados con metales pesados]. *Journal of Plant Protection Research*. 57, 173–184.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2006). Protocolo Estandarizado de Oferta Tecnológica para el Cultivo de Cacao en el Perú. ISSN: 2352-0094. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7494/BVE19039775e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Janeeshma, E. y Puthur, J. T. (2020). Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants [Influencia directa e indirecta de las micorrizas arbusculares en la mejora de la tolerancia a metales de las plantas]. *Archives of Microbiology*. 202, 1–16.

Jenkinson, S., y Ladd, N. (1981). Microbial biomass in soil: Measurement and turnover [Biomasa microbiana en el suelo: medición y rotación]. *In Soil biochemistry*, 5(1), 415-471.

Johnston, A., y Syers, J. (2009). A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture [Un nuevo enfoque para evaluar la eficiencia del uso del fósforo en la agricultura]. *Better Crops*, 93(3), 14-15. https://umanitoba.ca/faculties/afs/MAC_proceedings/proceedings/2009/Fixen_Johnston_Syers_BC.pdf

Koltai, H., y Kapulnik, Y. (2010) *Arbuscular mycorrhizas: Physiology and Function* (2° edition). Springer Science y Business Media. ISBN: 978-90-481-9488-9. DOI: 10.1007/978-90-481-9489-6

Latacela Coello, W., Colina Navarrete, E., Castro- Arteaga, C., Santana Aragón, D., León Paredes, J., García Vásquez, G., Goyes Cabezas, M., y Vera Suarez, M. (2017). Efectos de la fertilización nitrogenada y fosfatada sobre poblaciones de micorrizas asociadas al cultivo de cacao. *European Scientific Journal*, 13(6), 464–79. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n6p464>

Lenoir, I., Fontaine, J., y Sahraoui, A. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: a review [Respuestas de hongos micorrízicos arbusculares al estrés abiótico: una revisión]. *Phytochemistry*, 123, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.002>

Liu, Y., Zhang, C., Zhao, Y., Sun, S., y Liu, Z. (2016). Effects of growing seasons and genotypes on the accumulation of cadmium and mineral nutrients in rice grown in

cadmium contaminated soils [Efectos de las temporadas de crecimiento y genotipos sobre la acumulación de cadmio y nutrientes minerales en arroz cultivado en suelos contaminados con cadmio]. *Science of the Total Environment*, 579, 1282–1288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.115>

Lopes, P., Varón, M., Gonçalves de Oliveira, I., Valentim, J., Fonsêca, C., Siqueira, J., y De Souza, F. (2016). Enrichment of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation [Enriquecimiento de hongos micorrízicos arbusculares en un suelo contaminado después de la rehabilitación]. *Brazilian journal of microbiology*, 47, 853-862. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.06.001>

López, Y., Cunias, M., y Carrasco, Y. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(3), 344-352. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000300344&lng=es&tlng=es.

Lori, M., Armengot, L., Schneider, M., Schneidewind, U., Bodenhausen, N., Mäder, P., y Krause, H. M. (2022). Organic management enhances soil quality and drives microbial community diversity in cocoa production systems [La gestión orgánica mejora la calidad del suelo e impulsa la diversidad de la comunidad microbiana en los sistemas de producción de cacao]. *Science of The Total Environment*, 834, 155223.

Lori, M., Synnyczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., y Gattinger A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—a meta-analysis and meta-regression. *PLoS One* 12:e0180442. [10.1371/journal.pone.0180442](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442)

Lysenko, E., Klaus, A., Pshybytko, N., y Kusnetsov, V. (2015). Cadmium accumulation in chloroplasts and its impact on chloroplastic processes in barley and maize [Acumulación de cadmio en cloroplastos y su impacto en los procesos cloroplásticos en cebada y maíz]. *Photosynthesis research*, 125(1): 291-303.

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M., Lahori, A., Wang, Q., Li, R., y Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review [Desafíos y oportunidades en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados: una revisión]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 126, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>

McLaughlin, M. y Singh, B. (1995). Cadmium in soils and plants. Norway: Agricultural University of Norway.

- McLaughlin, M. y Singh, B. (1999). Cadmium in soils and plants (Chapeter 5). *Anthropogenic Additions of Cadmium to Soils*. Pp. 97-123. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS. https://www.researchgate.net/profile/Eiliv-Steinnes/publication/285221121_Anthropogenic_additions_of_cadmium_to_soil_a_review/links/5746b85b08ae9ace842442a0/Anthropogenic-additions-of-cadmium-to-soil-a-review.pdf
- Mendoza, K., Mostacero, J., López, S., Gil, A., De la Cruz, A., y Villena, L. (2021). Cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. "cacao" en la región San Martín (Lamas), Perú. *Manglar* 18(2): 169-173. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.022>
- Millar, N. S. y A. E. Bennett. (2016). Stressed out symbiotes: hypotheses for the influence of abiotic stress on arbuscular mycorrhizal fungi [Simbiontes estresados: hipótesis sobre la influencia del estrés abiótico en hongos micorrízicos arbusculares]. *Oecologia*, 182(3), 625– 641. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-016-3673-7>
- Ministerio de Agricultura y Riego (2004). Manual del Cultivo de Cacao. Programa para el desarrollo de la Amazonia, Proamazonia.
- Ministerio de Agricultura y Riego (2012). Catálogo de Cultivares de Cacao del Perú.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2016). Estudio del Cacao en el Perú y el Mundo. Un Análisis de la Producción y el Comercio. <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Riego (2018). Lineamientos de muestreo para la determinación de niveles de cadmio en suelos, hojas, granos y productos derivados del cacao (R.M. N°0451-2018-MINAGRI). <https://www.midagri.gob.pe/portal/resoluciones-ministeriales/rm-2018/22560-resolucion-ministerial-n-0451-2018-minagri-2>
- Ministerio de Agricultura y Riego (2019). Protocolo de muestreo de suelos con cadmio en zonas cacaoteras (R. M. N° 007-MINAGRI). <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/normas-legales/resolucionesministeriales/2019/enero/rm07-2019-minagri.pdf>
- Ministerio del Ambiente (2014). Guía para muestreo de suelos (D.S. N°002-2013-MINAM). http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf

- Ministerio del Ambiente (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (D.S. N°011-2017-MINAM). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/12893/DS_011-2017-MINAM.pdf?v=1530656729
- 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*, 1, 1-21.
- Morales, O., Borda, A., Argandoña, A., Farach, R., García, L., y Lazo, K. (2015). La Alianza Cacao Perú y la cadena productiva del cacao fino de aroma (1° edición). Gerencia para el Desarrollo 49. https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/111/Gerencia_para_el_desarrollo_49.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Moreira, D., y Castro, C. (2017). Sistemas agroforestales. Adaptación y mitigación en la producción de banano y cacao. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3049/BVE17068963e.pdf;jsessionid=1FFA88B9A11E2A1A04381F6997035E59?sequence=1>
- Mysliwa, B., Prasad, M., y Strzaltka, K. (2004). Photosynthesis in heavy metal stressed plants [Fotosíntesis en plantas estresadas por metales pesados]. *In Heavy metal stress in plants*, 1, 146-181. DOI: 10.1007/978-3-662-07743-6_6
- Navarro, M. y Mendoza, I. (2006). Cultivo del Cacao en Sistemas Agroforestales. Guía Técnica para Promotores. Programa para el Desarrollo Rural Sostenible en el Municipio El Castillo. http://canacacao.org/wp-content/uploads/Guia_Cacao_Para_Promotores.pdf
- Newman, E. (1966). A method of estimating the total length of root in a sample [Un método para estimar la longitud total de la raíz en una muestra]. *Journal of Applied Ecology*, 3, 139-145. <http://dx.doi.org/10.2307/2401670>
- Nies DH. (2003). Efflux-mediated heavy metal resistance in prokaryotes [Resistencia a metales pesados mediada por eflujo en procariotas]. *FEMS Microbiology Reviews*. 27, 313–339.
- Oblitas, J. (2015). *Producción orgánica de cacao (Theobroma cacao) en el valle del río apurímac, ene y mantaro (VRAEM)* [Trabajo monográfico, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM.

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/2079/F01-O12-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y Organización Mundial de la Salud (2019). Programa conjunto FAO/OMS sobre las normas alimentarias. Comité del Codex sobre Contaminantes de los Alimentos. 13^a reunión, Yogyakarta, Indonesia. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-13%252FWDs%252Fcf13_12s.pdf
- Orhue, E., y Uzu, O. (2011). Fate of some heavy metals in soils: a review [Destino de algunos metales pesados en suelos: una revisión]. *Journal Applied in Natural Science*, 3(1), 131-138. <https://doi.org/10.31018/jans.v3i1.171>
- Panwar, J., y Tarafdar, J. (2006) Distribution of three endangered medicinal plant species and their colonization with arbuscular mycorrhizal fungi [Distribución de tres especies de plantas medicinales amenazadas y su colonización con hongos micorrízicos arbusculares]. *Journal of Arid Environments*, 65(3), 337-350. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.07.008>
- 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 de Ciencia Animal*, 3(2): 366-385. <https://recia.edu.co/index.php/recia/article/view/412/454>
- Pérez, P. y Azcona, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3): 199-205. <https://www.redalyc.org/pdf/473/47324564010.pdf>
- Pérez, S. (2001). *Prospección y aplicación de micorrizas en especies vegetales autóctonas del matorral, para favorecer la revegetación de ecosistemas mediterráneos degradados* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. Repositorio UG. <http://hdl.handle.net/10481/35586>
- Pinedo, R. E. (2018). Sostenibilidad de sistemas de producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en agroecosistemas del distrito Chiara, Ayacucho. Tesis para optar el grado de doctor doctoris philosophiae en agricultura sustentable. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Phillips, J., y Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection

[Procedimientos mejorados para limpiar raíces y teñir hongos micorrícicos parásitos y vesiculares-arbusculares para una evaluación rápida de la infección]. *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)

Pocomucha, V., Alegre, J., y Abregú, L. (2016). Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada*, 15(2), 107-114. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.750>

Quilambo, O. (2003). The vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis [La simbiosis micorrícica vesicular-arbuscular]. *African Journal Biotechnology*, 2(12), 539-546. DOI: 10.5897/AJB2003.000-1105

Rankin, C.W., Nriagu, J.O., Aggarwal, J.K., Arowolo, T.A., Adebayo, K. y Flegal, A. R. (2005). Lead contamination in cocoa and cocoa products: isotopic evidence of global contamination [Contaminación por plomo en cacao y productos de cacao: evidencia isotópica de contaminación global]. *Environmental Health Perspectives*. 113, 1344–1348.

Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. In *Anales de la Facultad de Medicina*, 63(1): 51-64. <https://www.redalyc.org/pdf/379/37963107.pdf>

Ramtahal, G., Chang, I., Seegobin, D., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, W., y Harrynanan, L. (2012). Investigation of the effects of mycorrhizal fungi on cadmium accumulation in cacao [Investigación de los efectos de los hongos micorrícicos sobre la acumulación de cadmio en el cacao]. *Caribbean Food Crops Society*. 48,147-152. <https://www.researchgate.net/publication/274084675>

Redon, P., Béguiristain T., y Leyval C. (2008). Influence of *Glomus intraradices* on Cd partitioning in a pot experiment with *Medicago truncatula* in four contaminated soils [Influencia de *Glomus intraradices* en la partición de Cd en un experimento en maceta con *Medicago truncatula* en cuatro suelos contaminados]. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(10), 2710–2712. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.018>

Rigby, D., y Caceres, D. (2001). Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 68, 21-40.

Roberts, T. (2014). Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science [Fertilizantes de cadmio y fósforo: los problemas y la ciencia]. *Procedia*

- Rodríguez, H. (2017). *Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62944>
- Rosales, J., Breña, J., Sespedes, S., Huamanchumo de la Cuba, L., Centeno, L., Otiniano, A., Andrade, J., Valverde, S., y Castillo, J. (2020). Study to Determine Levels of Heavy Metals in Cocoa Crops Applied to Inland Areas of Peru: “The case of the Campo Verde-Honoría Tournavista Corridor” [Estudio para Determinar Niveles de Metales Pesados en Cultivos de Cacao Aplicado en Zonas Interiores del Perú: “El caso del Corredor Campo Verde-Honoría Tournavista”]. *Agronomy*. doi:10.20944/preprints202007.0339.v1
- Ryan, M., Derrick, J., y Dann, P. (2004). Grain mineral concentrations and yield of wheat grown under organic and conventional management [Concentraciones de minerales en granos y rendimiento de trigo cultivado bajo manejo orgánico y convencional]. *Journal Science Food and Agriculture*, 84(3), 207–216. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1634>
- Sandalio, L.; Dalurzo, H.; Gómez, M.; Romero-Puertas, M. y Del Río, L. (2001). Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants [Cambios inducidos por cadmio en el crecimiento y metabolismo oxidativo de plantas de guisantes]. *Journal of experimental botany*, 52(364), 2115-2126. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.364.2115>
- Sandoval-Pineda, J.F.; Pérez-Moneada, U.A.; Rodríguez, A. y Torres-Rojas, E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biológica Colombiana*. 2020, 25, 333–344.
- Santos, J. (2007). *Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in grasslands and arable fields. Ecological factors related to community composition and dynamics* [Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences]. Repositorio SUAS. https://www.researchgate.net/profile/Juan_Santos-Gonzalez/publication/30072977_Diversity_of_arbuscular_mycorrhizal_fungi_in_grasslands_and_arable_fields/links/0deec5340709b14d97000000/Diversity-of-arbuscular-mycorrhizal-fungi-in-grasslands-and-arable-fields.pdf

- 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 [Cacao y rendimientos totales del sistema de agrosilvicultura orgánica y convencional frente a sistemas de monocultivo en una prueba de campo a largo plazo en Bolivia]. *Experimental Agriculture*, 53(3), 351-374. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479716000417>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2020). Datos Meteorológicos a Nivel Nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>
- Shiferaw, B. A., Okello, J., y Reddy, R. V. (2009). Adoption and adaptation of natural resource management innovations in smallholder agriculture: reflections on key lessons and best practices. *Environment, Development and Sustainability*, 11(3), 601-619.
- Singh, K., Trivedi, P., Singh, G., Singh, B., y Patra, D. (2014). Effect of Different Leaf Litters on Carbon, Nitrogen and Microbial Activities of Sodic Soils [Efecto de diferentes hojarascas sobre el carbono, el nitrógeno y las actividades microbianas de los suelos sódicos]. *Land Degradation and Development*, 27(4): 1215-1226. <https://doi.org/10.1002/ldr.2313>
- Smith, P., House, J. I. Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P. C., Clark, J. M., Adhya, T., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P., Cotrufo, M. F., Elliott, J. A., McDowell, R., Griffiths, R. I., Asakawa, S., Bondeau, A., Jain, A. K., Meersmans, J. y Pugh, T. A. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*. 22, 1008–1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>
- Smith, S. y Read, D. (2008). Mycorrhizal symbiosis (3^o edition). Academic Press is an imprint of Elsevier. <https://www.agrifs.ir/sites/default/files/Sally%20E.%20Smith,%20David%20J.%20Read%20Mycorrhizal%20Symbiosis%20%202008.pdf>
- Sieverding, E., y Leihner, D. (1984). Influence of crop rotation and intercropping of cassava with legumes on VA mycorrhizal symbiosis of cassava [Influencia de la rotación de cultivos y el cultivo intercalado de yuca con leguminosas en la simbiosis micorrízica VA de la yuca]. *Plant and soil*, 80(1): 143-146.
- Sykorová, Z., Wiemken, A., y Redecker, D. (2007). Cooccurring *Gentiana verna* and *Gentiana acaulis* and their neighboring plants in two swiss upper montane meadows harbor distinct arbuscular mycorrhizal fungal communities [La concurrencia de

Gentiana verna y Gentiana acaulis y sus plantas vecinas en dos praderas montanas altas de Suiza alberga distintas comunidades de hongos micorrízicos arbusculares]. *Applied Environmental microbiology*, 73(17), 5426- 5434. <https://doi.org/10.1128/AEM.00987-07>

Tisdall, J. (1991). Fungal hyphae and structural stability of soil [Hifas fúngicas y estabilidad estructural del suelo.]. *Soil Research*, 29(6), 729-743. <https://www.publish.csiro.au/sr/SR9910729>

Trouvelot, A., Kough, J. y Gianinazzi, P. V. (1986). Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayanine signification fonctionnelle [Medición de la tasa de micorrización VA de un sistema radicular. Búsqueda de métodos de estimación con significado funcional]. *Soil sciences and vegetal productions*, 1, 217-221

Vallejos, G., Espinoza, E., Díaz, J., Solis, R., y Arévalo, L. (2021). The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Against Root-Knot Nematode Infections in Coffee Plants [El papel de los hongos micorrízicos arbusculares contra las infecciones por nematodos agalladores en las plantas de café]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 364–373. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00366-z>

Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulin, R., Lewis, C., Vazquez, J., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G. y Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar [Mitigación del nivel de cadmio en productos de cacao: revisión de la transferencia de cadmio del suelo a la barra de chocolate]. *Science of the total environment*, 781, 146779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779>

Varma, A. (2008). Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, Eco-Function, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-78826-3. DOI: 10.1007/978-3-540-78826-3

Villa, P., Martins, S., De Oliveira, S., Rodrigues, A., Pino, E., y Gill, D. (2020). Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+ [Foro de políticas: agricultura migratoria y agrosilvicultura en la Amazonía: premisas para REDD+]. *Forest Policy and Economics*, 118, 102217. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102217>

Waheed, R., Chang, D., Sarwar, S., y Chen, W. (2018). Forest, agriculture, renewable energy, and CO2 emission [Silvicultura, agricultura, energías renovables y emisiones

de CO₂]. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4231-4238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.287>

- Wang, G., Wang, L., Ma, F., Yang, D., y You, Y. (2021). Earthworm and arbuscular mycorrhiza interactions: Strategies to motivate antioxidant responses and improve soil functionality [Interacciones entre lombrices de tierra y micorrizas arbusculares: estrategias para motivar respuestas antioxidantes y mejorar la funcionalidad del suelo]. *Environmental Pollution*, 272, 115980. ISSN: 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115980>
- Weissenhorn, I., Leyval, C., Belgy, G., y Berthelin, J. (1995). Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy-metal uptake by maize (*Zea-mays* L) in pot culture with contaminated soil [Contribución de las micorrizas arbusculares a la absorción de metales pesados por parte del maíz (*Zea-mays* L) en cultivo en macetas con suelo contaminado]. *Mycorrhiza*, 5(4), 245–251. doi:10.1007/bf00204957
- Weissenhorn, I., Leyval, C., y Berthelin, J. (1993). Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils [Hongos micorrízicos arbusculares (AM) tolerantes a Cd de suelos contaminados con metales pesados]. *Plant and Soil*, 157(2), 247– 256.
- Wen, Y.B., Li, W., Yang, Z.F., Zhang, Q.Z. y Ji, J.F. (2020). Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China [Enriquecimiento e identificación de fuentes de Cd y otros metales pesados en suelos con alto trasfondo geoquímico en la región kárstica, suroeste de China]. *Chemosphere*. 125620. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125620>.
- Whittingham, J., y Read, D. (1982). Vesicular-arbuscular mycorrhiza in natural vegetation systems: III. Nutrient transfer between plants with mycorrhizal interconnections [Micorrizas vesiculares-arbusculares en sistemas de vegetación natural: III. Transferencia de nutrientes entre plantas con interconexiones de micorrizas]. *New Phytologist*, 90(2): 277-284. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1982.tb03259.x>
- Yongqiang, Y., Li, W., Chang, J., Gen, W., Fang, M., Yujiao, W., y Dongguang, Y. (2021). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and toxic element uptake of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud under zinc/cadmium stress [Efectos de hongos micorrízicos arbusculares sobre el crecimiento y la absorción de elementos tóxicos de *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud bajo tensión de zinc/cadmio]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, 112023. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112023>

- Yu, X., Cheng, J., y Wong, M. (2005). Earthworm-mycorrhiza interaction on Cd uptake and growth of ryegrass [Interacción lombriz-micorriza en la absorción de Cd y el crecimiento de raigrás]. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.029>
- Yzarra, W. y López, F. (2017). *Manual de Observaciones Fenológicas* (4° edición). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-11.pdf>
- Zhang, F., Li, Y., Yang, M. y Li, W. (2012). Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in northeast China [Contenido de metales pesados en alimentos para animales y estiércol de granjas de diferentes escalas en el noreste de China]. *International Journal of Environmental Research*. Public Health 9, 2658–2668.
- Zhen, Z., Liu, H., Guo, L., Meng, J., Ding, N., Wu, G., y Jiang, G. (2014). Effects of manure compost application on soil microbial community diversity and soil microenvironments in a temperate cropland in China [Efectos de la aplicación de compost de estiércol sobre la diversidad de la comunidad microbiana del suelo y los microambientes del suelo en una tierra de cultivo templada en China]. *PloS one*, 9(10), e108555. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108555>

TERMINOLOGÍA

Beneficios de sistemas agroforestales. Entre los principales beneficios que prestan los SAF se incluyen la recuperación, conservación y mejora de la biodiversidad, aumento de las reservas de carbono, fijación biológica de nitrógeno y el ciclaje de nutrientes, la disminución de la erosión y el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Villa *et al.*, 2020).

Biorremediación: Es una rama de la biotecnología que trata el uso de organismos vivos como microbios para eliminar contaminantes y toxinas del suelo y el agua. Puede usarse para limpiar problemas ambientales como un derrame de petróleo o agua subterránea (Singh *et al.*, 2014).

Cadmio por factores antropogénicos. Presencia de Cd en el suelo debido al desarrollo de las actividades humanas (agricultura), el cual favorece que el aporte de este metal llegue al suelo por el abuso en el uso de fertilizantes fosfatados y biosólidos (Ramírez, 2002).

Calidad de Suelo. Es la capacidad natural del suelo de cumplir diferentes funciones ecológicas, agronómicas, económicas, culturales, arqueológicas y recreacionales; asimismo, es el estado del suelo en función de sus características físicas, químicas y biológicas que le otorgan una capacidad de sustentar un potencial ecosistémico natural y antropogénicas (MINAM, 2014).

Caracterización del suelo. Es la determinación de las sustancias químicas y físicas del suelo como el tipo de suelo (% de arcilla, arena, limo), contenido de NPK, pH, densidad, cantidad de aluminio, la capacidad de intercambio catiónico, % de materia orgánica, textura del suelo, bases intercambiables, humedad, entre otros que conforman la estructura del suelo (Bautista *et al.*, 1998).

Clon de “cacao”. Son variedades mejoradas de “cacao” con amplia diversidad genética y niveles crecientes de resistencia a enfermedades, rendimiento y calidad aprovechando de esta forma el carácter predominantemente aditivo que tiene esta característica en el “cacao” (Cervantes *et al.*, 2006).

Fauna microbiana. Es la comunidad microbiana presente en el suelo, donde se considera el componente vivo de la MOS y representa en promedio del 1 al 4 % del carbono orgánico total (COT) del suelo (Jenkinson y Ladd, 1981).

Fósforo disponible. El fósforo (P) disponible es la forma aprovechable por las plantas en forma inmediata, es decir son fosfatos en la solución del suelo (Johnston y Syers, 2009).

Glomalina. Es una glicoproteína, un compuesto orgánico específico de los hongos micorrízicos (Wright y Upadhyaya, 1998). La glomalina actúa como secuestrante de metales pesados como el Cd (Bedini *et al.*, 2010).

Hifas micorrízicas. Son propágulos responsables para la ocurrencia de la colonización, donde naturalmente en muchos ecosistemas se encuentra una alta correlación con la colonización de plantas (Smith y Read, 2008).

Micelio: Está compuesto por largos filamentos denominados hifas. Si miramos al microscopio el sustrato sobre el que crecen (como la tierra o la madera), encontraremos que está invadido por las hifas. Lo que comúnmente se llama “hongo”, son los cuerpos fructíferos de los mismos, encargados de producir las esporas cuya función es la reproducción sexual (Rodríguez, 2017).

Rizosfera: Volumen de suelo influenciado por la presencia de raíces de una planta viva, cuya extensión puede variar de acuerdo al tipo de suelo, la especie de planta, su edad y otros factores. La interacción entre las bacterias y las raíces de las plantas puede ser beneficiosa; en este caso, se puede considerar la Rizosfera como una zona de amortiguación microbiológica en donde la microbiota sirve de protección a la planta frente al ataque de patógenos (Calvo *et al.*, 2008).

APÉNDICES

Apéndice 1: Resultados de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas de las variables Cd en hojas, suelos y granos de “cacao” de dos clones estudiados

Prueba de normalidad de datos mediante Shapiro Wilk

	RDUO Cadmio hoja (ppm)	RDUO Cadmio suelo (ppm)	RDUO Cadmio granos (ppm)
n	18	18	18
D. E	0,67	0,1	0,2
p (Unilateral D)	0,8711	0,3279	0,4293
Normal	Si	Si	Si

Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en hoja

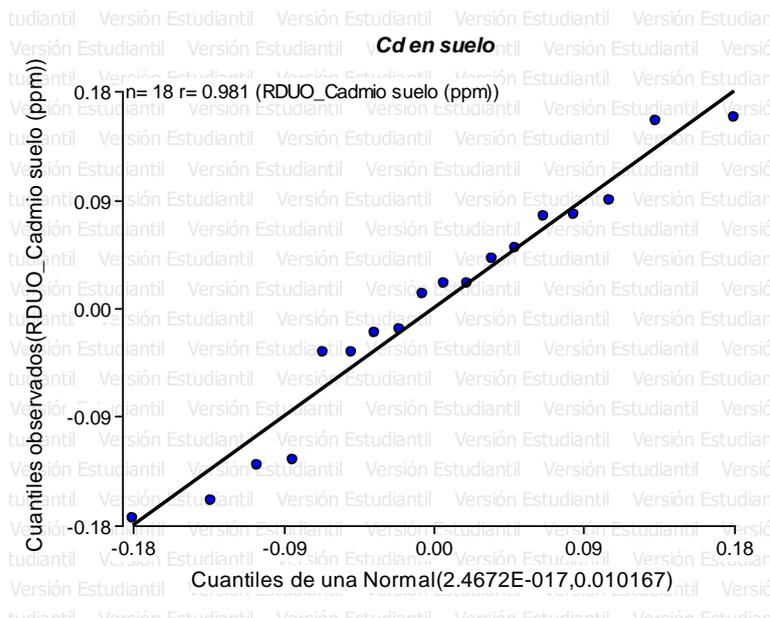
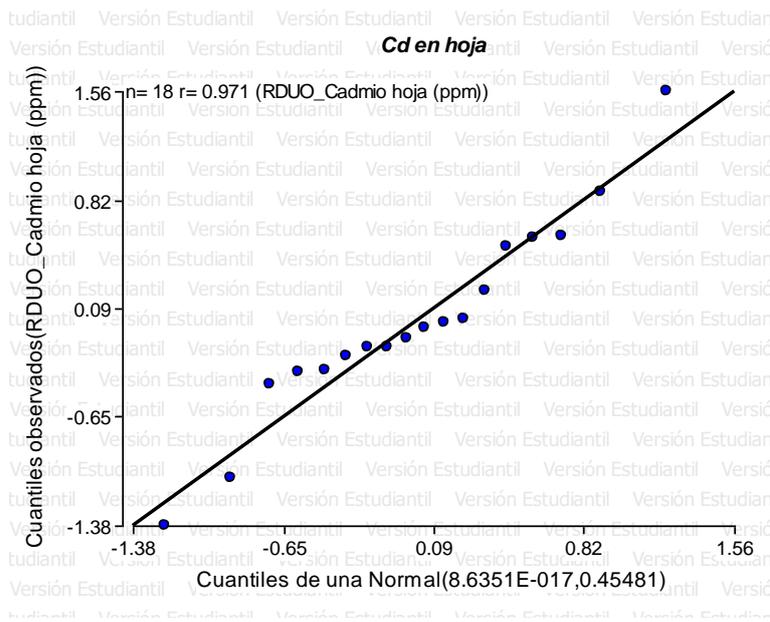
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,6	5	0,12	0,48	0,7841
Sistema de siembra	0,55	2	0,27	1,09	0,3684
Clones de “cacao”	0,0006	1	0,0006	0,002	0,9604
Sistema de siembra*Clones	0,06	2	0,03	0,11	0,893
Error	3,02	12	0,25		
Total	3,62	17			

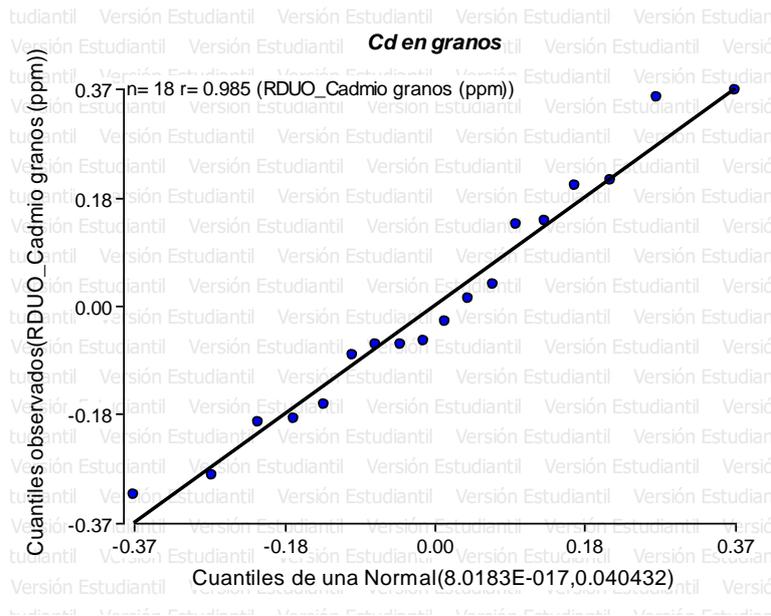
Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en suelo

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,03	5	0,01	2,01	0,1489
Sistema de siembra	0,02	2	0,01	3,94	0,0483
Clones de “cacao”	0,003	1	0,003	1,43	0,2553
Sistema de siembra*Clones	0,002	2	0,001	0,38	0,6941
Error	0,03	12	0,002		
Total	0,06	17			

Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en grano

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,13	5	0,03	3,85	0,0258
Sistema de siembra	0,02	2	0,01	1,27	0,3169
Clones de “cacao”	2,7E-07	1	2,7E-07	4,0E-05	0,9951
Sistema de siembra*Clones	0,12	2	0,06	8,36	0,0053
Error	0,08	12	0,01		
Total	0,22	17			





Interpretación:

En la prueba de normalidad de datos, calculado mediante Shapiro Wilk se determinó que cumplen con la distribución normal de datos obtenidos en campo (los tres contenidos de Cd); sin embargo, en la prueba de homogeneidad de varianzas, calculado mediante Levine, no se cumple este supuesto en los contenidos de Cd en suelo y granos ya que los datos del p-valor de los factores analizados son mayores al valor de f, por esta razón se tuvo que transformar datos a la función Raíz Cuadrada (X). Solo el contenido de Cd en hojas cumplió los supuestos de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas, por lo cual no fue necesario aplicar transformación de datos. Por último, se tiene los gráficos QQ-PLOT para verificar la distribución de las unidades experimentales.

Apéndice 2: Resultados de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas de los datos de micelio extraradical, colonización micorrícica y densidad de esporas en dos clones estudiados

Prueba de normalidad de datos mediante Shapiro Wilk

	RDUO Micelio (cm)	RDUO Colonización (%)	RDUO Densidad de esporas
n	18	18	18
D. E	3,24	0,92	0,5574
p (Unilateral D)	0,3153	0,5574	0,9514
Normal	Si	Si	Si

Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para micelio extraradical

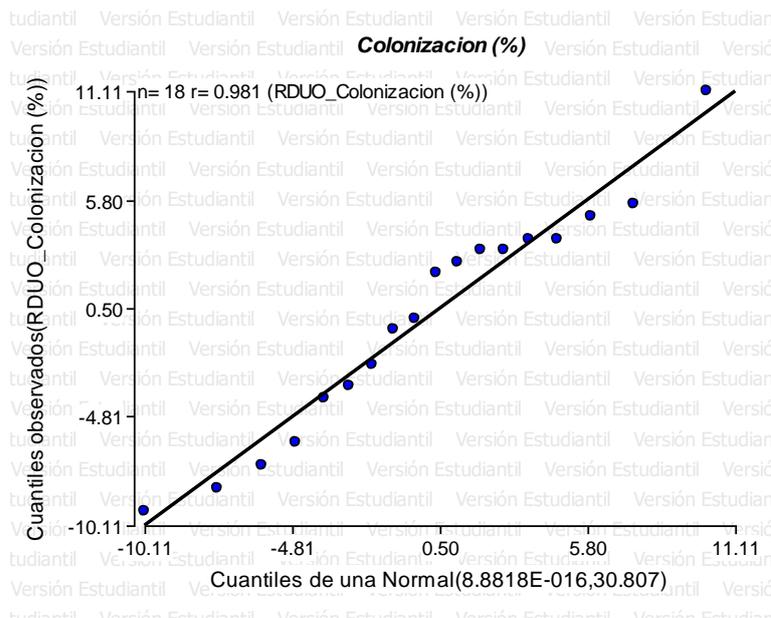
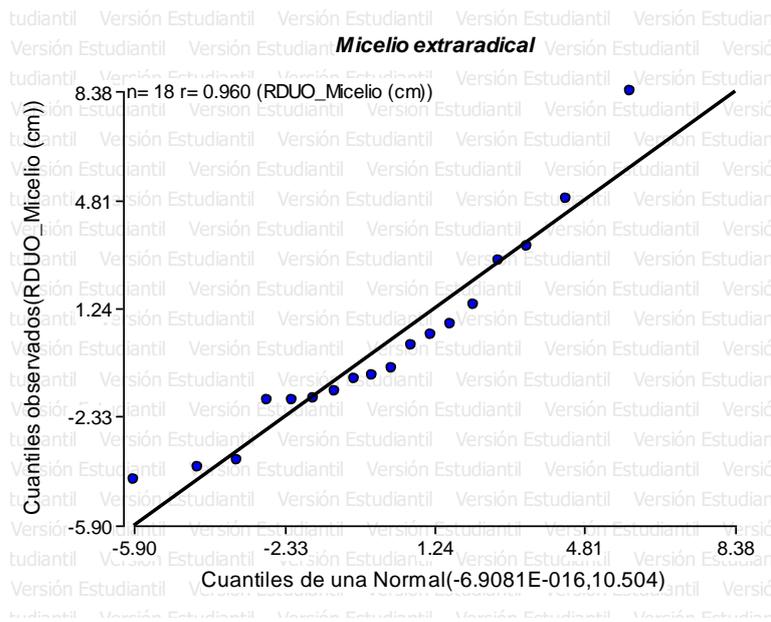
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	49	5	9,8	4,86	0,0116
Sistema de siembra	28,16	2	14,08	6,99	0,0097
Clones de “cacao”	3,69	1	3,69	1,83	0,2008
Sistema de siembra*Clones	17,15	2	8,57	4,25	0,0402
Error	24,19	12	2,02		
Total	73,19	17			

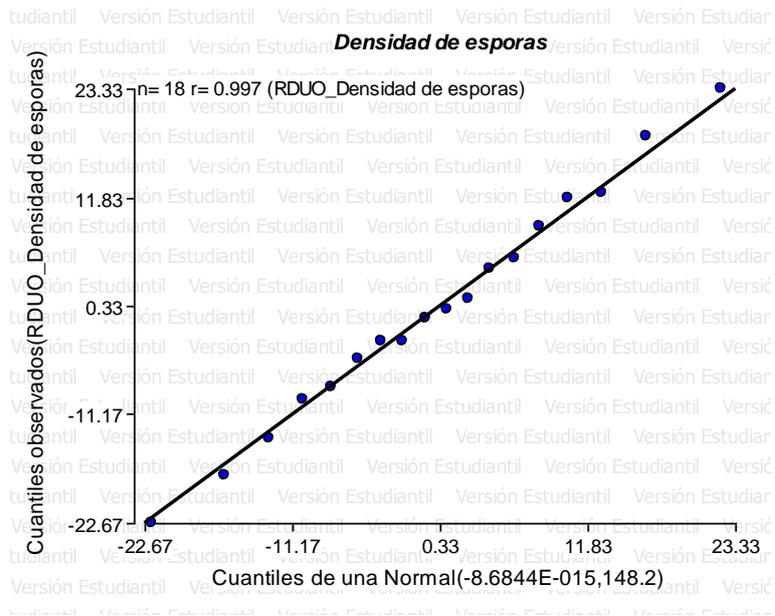
Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para colonización micorrícica

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	75,38	5	15,08	2,48	0,0917
Sistema de siembra	47,89	2	23,95	3,94	0,0484
Clones de “cacao”	4,42	1	4,42	0,73	0,4106
Sistema de siembra*Clones	23,07	2	11,53	1,9	0,1924
Error	72,96	12	6,08		
Total	148,35	17			

Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para la densidad de esporas

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	504,52	5	100,9	2,96	0,0574
Sistema de siembra	374,37	2	187,19	5,49	0,0203
Clones de “cacao”	80,22	1	80,22	2,35	0,151
Sistema de siembra*Clones	49,93	2	24,96	0,73	0,5013
Error	409,26	12	34,1		
Total	913,78	17			





Interpretación:

En la prueba de normalidad de datos, calculado mediante Shapiro Wilk se determinó que cumplen con la distribución normal de datos obtenidos en campo en las tres variables analizadas; sin embargo, en la prueba de homogeneidad de varianzas, calculado mediante Levine, no se cumple este supuesto en ninguna de las variables micorrízicas ya que los datos del p-valor de los factores analizados son mayores al valor de f, por esta razón se tuvo que transformar datos a la función Raíz Cuadrada (X). Por último, se tiene los gráficos QQ-PLOT para verificar la distribución de las unidades experimentales.

Apéndice 3: Resultado de análisis de suelo – caracterización



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00672183

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

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS – CARACTERIZACIÓN

N° SOLICITUD : AS0093-01-20
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - MARISCAL CACERES - JUANJUI - VILLA PRADO
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : JOSE VICTOR ROJAS SEGOVIA

FECHA DE MUESTREO : 02/09/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 10/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 18/09/2020

Sem	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.	Campo	Arenas	Limo								Arcilla	Ca ²⁺	Mg ²⁺			K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H ⁺					
																				cmol/kg				
01	20	09	0511	T1	6.48	0.29	<0.3	2.33	0.10	5.83	103	31.96	39.00	29.04	Fra-Arc	31.06	18.77	4.67	0.26	0.16	0.00	23.86	76.8	0.0

MÉTODOS:	HEDEMETRO
TEXTURA	POTENCIOMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
pH	CONDUCTIMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA 1:2.5
CONDUC. ELECTRICA	GAS - VOLUMETRICO
CARBONATOR	OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO ₃ -0.5M, pH 8.5 Dep. Va
FOSFORO DISPONIBLE	BRAYLEY y SLACE
POFASIO Y BORO INTERCAMBIABLE	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
MATERIA ORGANICA	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
ACIDEZ INTERC.	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
ACIDEZ POTENCIAL	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
CIC pH 7.0	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
Fe, Cu, Zn y Mn	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
BORO	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
ADUFRE	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA
METALES PESADOS	EXTRACT. KCl 1N VOLUMETRIA

La Banda de Shilcayo, 18 de Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU
 Cesar O. Arévalo Hernandez, MSc
 JEFE DE OPTO. DE SUELOS

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



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 SUELOS – CARACTERIZACIÓN

N° SOLICITUD : A50093-04-20
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - LAMAS - ZAPATERO - CEDRO PAMPA
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : FREDY URQUIA SATALAYA

FECHA DE MUESTREO : 14/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 10/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 10/09/2020

Bem.	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.	Campe	Arena	Limo								Arcilla	Ca ²⁺	Mg ²⁺			K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H ⁺					
			%									cmol/kg												
01	20	09	0514	T4	5.82	0.08	<0.3	2.91	0.13	3.76	128	16.95	30.00	53.04	Arc	21.33	15.88	0.77	0.33	0.16	0.00	17.13	80.3	0.0

MÉTODOS:	
TEXTURA	: HEDROMETRO
pH	: POTENCIOMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
CONDUC. ELÉCTRICA	: CONDUCTIVIMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	: GAS-VOLÚMETRICO
FOSFORO DISPONIBLE	: OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO ₃ + 0.5M. pH 8.5 Exp. 16h
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	: BRIDGE-COORHN. pH 7. Absorción Atómica
MATERIA ORGÁNICA	: WALKLEY y BLACK
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	: EXTRACT. KOH 1M a 20°C + COORHN. pH 7. Absorción Atómica
ACIDEZ INTERC.	: EXTRACT. KCl 1N VOLÚMETRICA
ACIDEZ POTENCIAL	: WOODRUFF MODIFICADO
CIC (pH 7.0)	: ACIDEZ POTENCIAL + SUMA DE BASES
Fe, Cu, Zn y Mn	: OLSEN Modificado extra. NaHCO ₃ + 0.5M. pH 8.5 Absorción Atómica
BORO	: Extracción / Espectrometría UV-Vis (λ=685 nm)
ALUMINIO	: Extracción / Tubalimetría (λ=420 nm)
METALES PESADOS	: SPA 30506

La Banda de Shilcayo, 18 de Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERÚ
 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

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



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPET N° 00072183

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

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS – CARACTERIZACIÓN

N° SOLICITUD : AS0093-06-20
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - RIOJA - PARDO MIGUEL NARANJOS - YARINAL
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : ROGELIO LAPIZ CHECAN

FECHA DE MUESTREO : 16/09/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 10/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 18/09/2020

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.	09	0516	Campo								Arena	Limo	Arcilla			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H ⁺			
												%												
01	20	09	0516	T6	6.05	0.08	<0.3	3.89	0.18	18.05	39	28.96	30.00	41.04	Arc	16.44	8.75	2.26	0.10	0.13	0.00	11.24	68.4	0.0

MÉTODOS:	
TEXTURA	: HIROMETRO
pH	: POTENCIOMETRO - SUSPENSION SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
CONDUC. ELECTRICA	: CONDUCTIMETRO - SUSPENSION SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	: GAS - VOLUMETRICO
FOSFORO DISPONIBLE	: OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO ₃ +0.5M, pH 8.5 Exp. Via
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	: NH ₄ OH-COONH ₄ , pH 7, Absorción Atómica
MATERIA ORGANICA	: WALKLEY y BLACK
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	: EXTRACT. KOH-TN e NH ₄ OH-COONH ₄ , pH 7, Absorción Atómica
ACIDEZ INTERC.	: EXTRACT. ACI 1% VOLUMETRICA
ACIDEZ POTENCIAL	: WOODRUFF MODIFICADO
CIC pH 7.0	: ACIDEZ POTENCIAL-SUMA DE BASES
Fe, Cu, Zn y Mn	: OLSEN Modificado extra. NaHCO ₃ +0.5M, pH 8.5 Absorción Atómica
BORO	: Extracción / Espectrometría UV-Vis (p=655 nm)
AZUFRE	: Coloración / Turbidimetría (λ=425 nm)
METALES PESADOS	: EPA 3000B

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

La Banda de Shilcayo, 18 de Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAMOTO - PERU
 Cesar O. Arevalo Fernández, MSc
 JEFE DE DEPTO. DE SUELOS

Apéndice 4: Datos hidrometeorológicos de las zonas de estudio

– **Climatología**

Se solicitaron los datos al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) de las estaciones más cercanas al área de investigación. Los datos hidrometeorológicos de las tres provincias se muestran a continuación:

1. Datos hidrometeorológicos en M. Cáceres

En la Tabla 1 se muestra las condiciones ambientales de Mariscal Cáceres; los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica del Distrito de Pachiza,

- Estación: Pachiza
- Departamento: San Martín
- Provincia: Mariscal Cáceres
- Distrito: Juanjuí
- Latitud: 7°17'35.6" Longitud: 76°46'15.3" Altitud: 286 msnm.

Tabla 1

Condiciones ambientales de Mariscal Cáceres

Mes/ año	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)	Precipitación (Mm/Día) Total
	Max	Min		
May-19	34,63	19,05	78,57	8,36
Jun-19	34,79	18,95	79,76	7,50
Jul-19	34,81	18,80	78,95	5,75
Ago-19	34,55	18,55	79,43	3,19
Set-19	34,87	18,79	79,95	4,53
Oct-19	34,21	18,77	80,60	8,00
Nov-19	34,87	19,56	80,22	5,52
Dic-19	34,86	20,85	79,37	9,18

Nota. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMH], (2020).

2. Datos hidrometeorológicos en Pinto Recodo – Lamas

En la Tabla 2 se muestra las condiciones ambientales de Pinto recodo- Lamas; los datos se obtuvieron de estación meteorológica de Lamas.

- Estación: Lamas
- Departamento: San Martín
- Provincia: Lamas
- Distrito: Pinto Recodo
- Latitud: 6°25'7.5" Longitud: 76°31'40.6" Altitud: 840 msnm.

Tabla 2

Condiciones ambientales de Pinto Recodo

Mes/Año	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)	Precipitación (Mm/Día)
	Max	Min		
Ene-20	28,75	20,90	87,03	3,02
Feb-20	28,96	20,00	86,65	2,86
Mar-20	29,90	19,91	84,56	3,16
Abr-20	-	-	-	-
May-20	-	-	-	-
Jun-20	-	-	-	-
Jul-20	26,80	18,60	95,60	0,00
Ago-20	29,34	19,69	86,82	-37,20
Set-20	29,17	19,43	87,09	4,77
Oct-20	30,63	19,93	84,00	2,39

Nota. SENAMHI, (2020).

3. Datos hidrometeorológicos en Naranjos – Rioja

En la Tabla 3 se muestra las condiciones ambientales de Pardo Miguel Naranjos- Rioja; los datos se obtuvieron de la estación meteorológica de Naranjillo.

- Estación: Naranjillo
- Departamento: San Martín
- Provincia: Rioja
- Distrito: Naranjos
- Latitud: 5°48'34.7" Longitud: 77°23'33.5" Altitud: 880 msnm.

Tabla 3

Condiciones ambientales de Naranjos - Rioja

Mes/Año	Temperatura (°C)	Precipitación (Mm/Hora)	Humedad (%)	Dirección Del Viento (°)	Velocidad Del Viento (M/S)
Ene-20	22,50	0,04	90,04	197,02	1,61
Feb-20	22,51	0,18	90,30	204,25	1,66
Mar-20	22,86	0,22	89,83	186,01	1,56
Abr-20	22,63	0,30	89,78	176,67	1,57
May-20	22,82	0,09	88,66	163,71	1,48
Jun-20	22,81	0,11	85,96	167,65	1,42
Jul-20	22,10	0,14	88,57	123,10	1,16
Ago-20	22,61	0,06	82,32	147,95	1,52
Set-20	21,88	0,23	88,36	170,67	1,00
Oct-20	22,41	0,17	82,88	150,40	0,00

Nota. SENAMHI, (2020).

Apéndice 5: Análisis de suelo – cadmio (Cd)



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 – CADMIO

Nº SOLICITUD : AS0108-01-20
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - JUANJUI- MARISCAL CACERES
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : JOSE VICTOR ROJAS SEGOVIA

FECHA DE MUESTREO : 02/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 21/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 24/09/2020

Item	Número de la muestra				Cd (ppm)
	Lab.		Campo		
01	20	09	0586	T1 BI	0.12
02	20	09	0587	T1 BII	0.34
03	20	09	0588	T1 BIII	0.31

MÉTODOS :
 CADMIO : EPA 3050B

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

La Banda de Shilcayo, 24 Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU

 Cesar O. Araviza Hernandez, MSc
 JEFE DE CEN. DE SUELOS



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 – CADMIO

Nº SOLICITUD : AS0108-02-20
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - JUANJUI- MARISCAL CACERES
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : JOSE VICTOR ROJAS SEGOVIA

FECHA DE MUESTREO : 02/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 21/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 24/09/2020

Item	Número de la muestra				Cd (ppm)
	Lab.		Campo		
01	20	09	0589	T2 BI	0.33
02	20	09	0590	T2 BII	0.40
03	20	09	0591	T2 BIII	0.11

MÉTODOS :
 CADMIO : EPA 3050B

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

La Banda de Shilcayo, 24 Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU

 Cesar O. Araviza Hernandez, MSc
 JEFE DE CEN. DE SUELOS

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA
CERTIFICADO INDECOPFI N° 00072183**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS****REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS – CADMIO**

N° SOLICITUD : AS0107-01-20
 SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERREO
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - LAMAS - PINTO RECODO
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : SANTOS CACHIQUE SANGAMA

FECHA DE MUESTREO : 13/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 21/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 24/09/2020

Item	Número de la muestra				Cd (ppm)
	Lab.		Campo		
01	20	09	0574	T3 BI	0.30
02	20	09	0575	T3 BII	0.40
03	20	09	0576	T3 BIII	0.48

MÉTODOS :	
CADMIO	: EPA 3050B

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

La Banda de Shilcayo, 24 Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAMOTO - PERU
 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA
CERTIFICADO INDECOPFI N° 00072183**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS****REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS – CADMIO**

N° SOLICITUD : AS0107-04-20
 SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERREO
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - RIOJA - PARDO MIGUEL NARANJOS
 CULTIVO : CACAO
 AGRICULTOR : ROGELIO LAPIZ CHECAN

FECHA DE MUESTREO : 16/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 21/09/2020
 FECHA DE REPORTE : 24/09/2020

Item	Número de la muestra				Cd (ppm)
	Lab.		Campo		
01	20	09	0583	T6 BI	0.12
02	20	09	0584	T6 BII	<0.1
03	20	09	0585	T6 BIII	<0.1

MÉTODOS :	
CADMIO	: EPA 3050B

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

La Banda de Shilcayo, 24 Setiembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAMOTO - PERU
 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Apéndice 6: Análisis foliar – cadmio (Cd)



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 : AF0012-05-20
SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERRERO /MARIA DEL PILAR NAVARRO CASIQUE
PROCEDENCIA : SAN MARTIN - MARISCAL CACERES -JUANJUI - VILLA PRADO
TEJIDO VEGETAL : HOJAS DE CACAO
PRODUCTOR : JOSE VICTOR ROJAS SEGOVIA

FECHA DE MUESTREO : 03/08/2020
FECHA DE RECEP. LAB : 18/08/2020
FECHA DE REPORTE : 24/08/2020

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	20	08	0139	TI-BI	1.43
02	20	08	0140	TI-BII	0.44
03	20	08	0141	TI-BIII	1.13

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, 24 de Agosto del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERU
Cesar Q. Arevalo Hernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS



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 : AF0012-04-20
SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERRERO /MARIA DEL PILAR NAVARRO CASIQUE
PROCEDENCIA : SAN MARTIN - LAMAS - ZAFATERO - CEDRO PAMPA
TEJIDO VEGETAL : HOJAS DE CACAO
PRODUCTOR : FREDY URQUIA SATALAÑA

FECHA DE MUESTREO : 13-14/08/2020
FECHA DE RECEP. LAB : 18/08/2020
FECHA DE REPORTE : 24/08/2020

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	20	08	0136	T4-BI	2.42
02	20	08	0137	T4-BII	1.43
03	20	08	0138	T4-BIII	1.84

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, 24 de Agosto del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERU
Cesar Q. Arevalo Hernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPRI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS**REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR – CADMIO**

N° SOLICITUD : AF0012-01-20 FECHA DE MUESTREO : 17/08/2020
 SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERRERO /MARIA DEL PILAR NAVARRO CASIQUE FECHA DE RECEP. LAB : 18/08/2020
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - RIOJA - PARDO MIGUEL NARANJOS - YARINAL FECHA DE REPORTE : 24/08/2020
 TEJIDO VEGETAL : HOJAS DE CACAO
 PRODUCTOR : AMERICO HERNANDEZ MONTENEGRO

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	20	08	0127	T5 -BI	0.92
02	20	08	0128	T5 -BII	1.97
03	20	08	0129	T5 -BIII	2.81

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 Cálculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 24 de Agosto del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU
 Cesar O. Alvarez Hernández, MSc
 JEFE DE OPTO. DE SUELOS

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPRI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS**REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR – CADMIO**

N° SOLICITUD : AF0012-02-20 FECHA DE MUESTREO : 17/08/2020
 SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERRERO /MARIA DEL PILAR NAVARRO CASIQUE FECHA DE RECEP. LAB : 18/08/2020
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - RIOJA - PARDO MIGUEL NARANJOS - YARINAL FECHA DE REPORTE : 24/08/2020
 TEJIDO VEGETAL : HOJAS DE CACAO
 PRODUCTOR : ROGELIO LAPIS CHECAN

ITEM	Número de Muestra				CADMIO ppm
	Laboratorio		Campo		
01	20	08	0130	T6 -BI	4.70
02	20	08	0131	T6 -BII	2.97
03	20	08	0132	T6 -BIII	2.97

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 Cálculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 24 de Agosto del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU
 Cesar O. Alvarez Hernández, MSc
 JEFE DE OPTO. DE SUELOS

Apéndice 7: Análisis de granos – cadmio (Cd)



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA
CERTIFICADO INDECOP Nº 00072183

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

REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO

Nº SOLICITUD : AA0013-01-20
SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERREO
PROCEDENCIA : SAN MARTIN - JUANJUI - VILLA PRADO
ALIMENTO : GRANO DE CACAO
AGRICULTOR : JOSE VICTOR ROJAS SEGOVIA

FECHA DE MUESTREO : 03/08/2020
FECHA DE RECEP. LAB : 14/10/2020
FECHA DE REPORTE : 21/10/2020

Item	Número de Muestra			Usuario	CADMIO ppm
	Laboratorio				
01	20	10	0163	T1 BI	0.61
02	20	10	0164	T1 BII	0.09
03	20	10	0165	T1 BIII	0.76

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

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

La Banda de Shilcayo, 21 de Octubre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERÚ
Cesar O. Alvarado Hernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA
CERTIFICADO INDECOP Nº 00072183

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

REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO

Nº SOLICITUD : AA0013-04-20
SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERREO
PROCEDENCIA : SAN MARTIN - ZAPATERO - CEDRO PAMPA
ALIMENTO : GRANO DE CACAO
AGRICULTOR : FREDY URQUIA SATALAYA

FECHA DE MUESTREO : 14/08/2020
FECHA DE RECEP. LAB : 14/10/2020
FECHA DE REPORTE : 21/10/2020

Item	Número de Muestra			Usuario	CADMIO ppm
	Laboratorio				
01	20	10	0172	T4 BI	0.31
02	20	10	0173	T4 BII	0.48
03	20	10	0174	T4 BIII	0.55

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

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

La Banda de Shilcayo, 21 de Octubre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERÚ
Cesar O. Alvarado Hernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA
CERTIFICADO INDECOPF N° 00072183**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS****REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO**

N° SOLICITUD : AA0023-01-20
 SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERREO
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - PARDO MIGUEL NARANJOS - YARINAL
 ALIMENTO : GRANO DE CACAO
 AGRICULTOR : AMERICO HERNANDEZ MONTENEGRO

FECHA DE MUESTREO : 17/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 23/11/2020
 FECHA DE REPORTE : 30/11/2020

Item	Número de Muestra			CADMIO ppm
	Laboratorio	Usuario		
01	20 11 0287	T5 BI		1.13
02	20 11 0288	T5 BII		1.01
03	20 11 0289	T5 BIII		1.23

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, 30 de Noviembre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARPATO - PERU
 Cesar S. Arango Hernandez, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA
CERTIFICADO INDECOPF N° 00072183**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS****REPORTE DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS - CADMIO**

N° SOLICITUD : AA0013-05-20
 SOLICITANTE : IRMA ELISZTH HUANANGUE GUERREO
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - PARDO MIGUEL NARANJOS - YARINAL
 ALIMENTO : GRANO DE CACAO
 AGRICULTOR : ROGELIO LAPIZ CHECAN

FECHA DE MUESTREO : 16/08/2020
 FECHA DE RECEP. LAB : 14/10/2020
 FECHA DE REPORTE : 21/10/2020

Item	Número de Muestra			CADMIO ppm
	Laboratorio	Usuario		
01	20 10 0175	T6 BI		1.56
02	20 10 0176	T6 BII		0.91
03	20 10 0177	T6 BIII		1.03

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, 21 de Octubre del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARPATO - PERU
 Cesar S. Arango Hernandez, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS