



Esta obra está bajo una Licencia
Creative Commons Atribución -
4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Vea una copia de esta licencia en
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Tesis

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

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

Autor:

Stefany Solsol Salis

<https://orcid.org/0000-0001-8500-0146>

Asesor:

Dr. Geomar Vallejos Torres

<https://orcid.org/0000-0001-7084-977X>

Tarapoto, Perú

2024



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Tesis

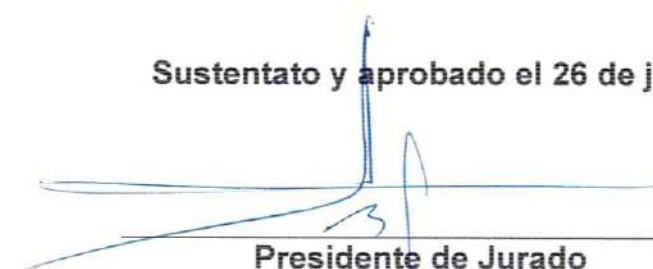
**Micorrización y concentración de cadmio en
sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma
cacao* L.), en San Martín**

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

Autor:

Stefany Solsol Salis

Sustentato y aprobado el 26 de junio de 2024, ante el honorable jurado


Presidente de Jurado
Dr. Agustín Cerna Mendoza


Secretario de Jurado
Dra. Blga. Yoni Meni Rodríguez
Espejo


Vocal de Jurado
Dra. Ana Noemí Sandoval Vergara


Asesor
Dr. Geomar Vallejos Torres

Tarapoto, Perú

2024



Acta de sustentación de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos Nº 011-2024-EPA-FCA-UNSM

Jurado reconocido con Resolución de Consejo de Facultad Nº 343-2023-UNSM/FCA/CF

Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía.

A las 10:30 horas, del 26 de Junio de 2024, en el Auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNSM, inicio el acto público de sustentación del trabajo de investigación "Micorrización y concentración de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.), en San Martín" para optar el título profesional de **Ingeniero Agrónomo**, presentado por la Bach. Stefany Solsol Salis, con la asesoría del Dr. Geomar Vallejos Torres.

Instalada la Mesa Directiva conformada por Dr. Agustín Cerna Mendoza (presidente del jurado), Dra. Blga. Yoni Meni Rodríguez Espejo (secretario), Dra. Ana Noemí Sandoval Vergara (vocal), y acompañado por el Dr. Geomar Vallejos Torres (asesor); el presidente de jurado dirigió brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la Resolución de consejo de Facultad Nº 343-2023-UNSM/FCA/CF.

Seguidamente el autor expuso el trabajo de investigación y el jurado evaluador realizó las preguntas pertinentes, respondidas por el sustentante y eventualmente, con la venia del jurado, por el asesor. Una vez terminada la ronda de preguntas, el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto, sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según la Tabla Nº 2 del Anexo 4.2 del RG – CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue 15.....; tal como se deja constar en la siguiente descripción:

Criterio	Graduación	Puntaje medio	Jurado 1	Jurado 2	Jurado 3
Aspectos preliminares sobre el informe (50%):					
Originalidad de la investigación.	Excelente	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
	Bueno				
Claridad en la identificación del problema, hipótesis de trabajo y objetivos propuestos.	Excelente			<u>2</u>	
	Bueno	<u>1.33</u>	<u>1</u>		<u>1</u>
Criterio en la selección y tratamiento de	Excelente		<u>1</u>	<u>1</u>	



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN MARTÍN

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

Acta de sustentación de trabajos de investigación conducentes a grados
y títulos Nº 011-2024-EPA-FCA-UNSM

la información bibliográfica.	Bueno	0.83			0.5
Identificación adecuada de las variables para el estudio. Pertinencia del diseño experimental o muestral, de corresponder.	Excelente				2
	Bueno	1.33	1	1	
Redacción científica y cumplimiento de las normas de estilo.	Excelente		1		
	Bueno	0.66		0.5	0.5
Calidad de los resultados y su tratamiento.	Excelente		2		
	Bueno	1.33		1	1
Conclusiones.	Excelente		1		1
	Bueno	0.83		0.5	
Aspectos relacionados con la presentación pública (50%):					
Estructura de la exposición	Excelente			3	
	Bueno	2.33	2		2
	Regular				
Fluidez de la exposición	Excelente				
	Bueno	2	2	2	2
	Regular				
Dominio y suficiencia en el tema (respuestas)	Excelente				
	Bueno	2.33	2		2
	Regular				
Uso del tiempo	Óptimo	1	1	1	1
Puntajes totales		14.97	15	16	14

De acuerdo con el Artículo 40° del RG – CTI, la nota obtenida es 15..... y correspondiente a la calificación de BUENO..... Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendario.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones Nº 011 de la Escuela Profesional de Agronomía.

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del trabajo de investigación en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 11:50... horas, el mismo día, 26. de 06. de 2024.

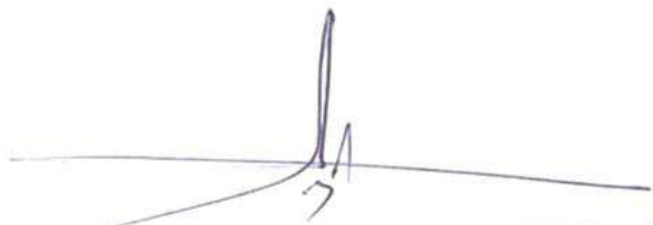


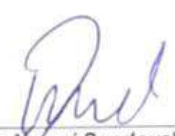
UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN MARTIN

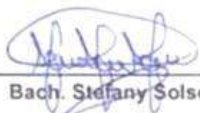
FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

Acta de sustentación de trabajos de investigación conducentes a grados
y títulos Nº 011-2024-EPA-FCA-UNSM


Dra. Blga. Yoni Meni Rodriguez Espejo
Secretario del jurado


Dr. Agustin Cerna Mendoza
presidente del jurado


Dra. Ana Noemi Sandoval Vergara
Vocal del jurado


Bach. Stefany Solsol Salis
Autor


Dr. Geomar Vallejos Torres
Asesor

Declaratoria de autenticidad

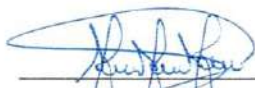
Stefany Solsol Salis, con DNI N° 71583805, egresado de la Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: Micorrización y concentración de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.), en San Martín.

Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de nuestra autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada;
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumimos bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Tarapoto, 26 de junio del 2024


Stefany Solsol Salis
D.N.I. 71583805



Ficha de identificación

Título del proyecto Micorrización y concentración de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.), en San Martín.	Área de investigación: Ciencias Agrícolas y Forestales Línea de investigación: Silvicultura y manejo forestal sostenible. Sublínea de investigación: Estudios de carbono y metales pesados. Grupo de investigación: Investigaciones en biotecnología agroforestal, (Resolución N°102-2022-UNSM/FCA/CF) Tipo de investigación: Básica ☐ , Aplicada ☒ , Desarrollo experimental ☐
Autor: Stefany Solsol Salis	Facultad de Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Agronomía https://orcid.org/0000-0001-8500-0146
Asesor: Dr. Geomar Vallejos Torres	Dependencia local de soporte: Facultad de Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Agronomía Unidad o Laboratorio Agronomía https://orcid.org/0000-0001-7084-977X

Dedicatoria

A Dios por la salud por protegerme siempre durante mi camino y ser mi fortaleza necesaria en los momentos de debilidad.

A mis padres con amor Jhoana Salis y Oswaldo Solsol, por su apoyo incondicional, confianza, valores y consejos que me brindaron para hacer de mi una mejor persona en todo este proceso de cada etapa de mi vida por ayudarme a culminar a cumplir mis objetivos.

A mi hermano Kevin Solsol, por ser mi mayor motivación en este proceso y etapa de mi vida para salir adelante.

Agradecimientos

Al Instituto de Investigación y Desarrollo (IlyD) por brindarme el apoyo financiero de la tesis en la ejecución.

A la Universidad Nacional de San Martín, a los docentes de la Escuela Profesional de Agronomía por los conocimientos impartidos durante mis estudios profesionales.

Al asesor Dr. Geomar Vallejos Torres por su orientación en el cumplimiento de la tesis y al Ing. M.Sc. Harry Saavedra Alva por el apoyo en la transcripción de la tesis.

A mi compañero Max Fran Panduro Pinedo por el apoyo de ejecución de la tesis de inicio a fin.

Índice general

Ficha de identificación	6
Dedicatoria	7
Agradecimientos.....	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN.....	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes de la investigación	18
2.2. Fundamentos teóricos.....	20
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación	29
3.1.1. Ubicación política.....	29
3.1.2. Ubicación geográfica	30
3.1.3. Periodo de ejecución	30
3.1.4. Autorizaciones y permisos	30
3.1.5. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	30
3.1.6. Aplicación de principios éticos internacionales.....	30
3.2. Sistema de variables	30
3.2.1. Variables principales	30
3.2.2. Variables secundarias.....	31
3.3. Procedimientos de la investigación	31
3.3.1. Determinación de la correlación entre la colonización micorrízica y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín	32
3.3.2. Determinación de la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín	36

3.3.3. Evaluación de la correlación entre la colonización micorrízica y las características del suelo (pH, materia orgánica y fosforo) en plantaciones de cacao en la región San Martín	40
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1. Determinación de la correlación entre la colonización micorrízica y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín.....	41
4.2. Determinación de la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín.....	42
4.3. Evaluación de la correlación entre la colonización micorrízica y las características del suelo (pH, materia orgánica y fosforo) en plantaciones de cacao en la región San Martín	47
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

Índice de tablas

Tabla 1 Zonas de muestreo y su respectiva composición	31
Tabla 2 Porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao	41
Tabla 3 Test de Duncan para la concentración de cadmio en muestras de suelo raíces, hojas y granos del cultivo de cacao	42
Tabla 4 Concentración de cadmio (ppm) en raíces de cacao	44
Tabla 5 Comparación de Duncan para la variable concentración de cadmio en muestras foliares.....	45
Tabla 6 Concentración de cadmio (ppm) en granos de cacao	46
Tabla 7 Valores del coeficiente de correlación de Pearson para porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao	47

Índice de figuras

<i>Figura 1</i> Ubicación geográfica de la provincia de Lamas	30
<i>Figura 2</i> Selección e identificación de las zonas de muestreo en las diferentes parcelas de cacao (A), demarcación de las parcelas (B).....	32
<i>Figura 3</i> Estructuras micorrísticas de HMA en raíces de cacao evaluadas en el microscopio de la localidad de San Antonio (Cacao + Especies forestales).....	33
<i>Figura 4</i> Extracción y selección de raíces secundarias (A) y terciarias (B) de cacao ..	34
<i>Figura 5</i> Colonización micorrízica de raíces de cacao de la localidad, (A) Cedro Pampa (Cacao + Guaba, (B) San Antonio (Cacao + Especies forestales) (C) San Antonio (Cacao +) Policultivo, (D) Tabalosos (Cacao)	35
<i>Figura 6</i> Muestreo del suelo para analizar la concentración de cadmio (A) y rotulación de muestras por cada parcela (B).....	37
<i>Figura 7</i> Muestreo de raíces para analizar la concentración de cadmio (A) y (B).....	37
<i>Figura 8</i> Muestreo foliar para conocer las concentraciones de cadmio (A), rotulación y separación de hojas por cada parcela muestreada (B)	38
<i>Figura 9</i> Muestreo de granos de cacao para conocer la concentración de cadmio (A) y revisión de frutos sanos (B)	39
<i>Figura 10</i> Muestreo de suelo	40
<i>Figura 11</i> Valores del coeficiente de correlación de Pearson para la concentración de cadmio en el suelo, raíces, hojas y granos de cacao	49

RESUMEN

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

Esta investigación se efectuó en 3 localidades cacaoteras de la provincia de Lamas y dentro de las instalaciones del “Laboratorio de Cultivos de Tejidos Vegetales de la Facultad de Ciencias Agrarias de la (UNSM)” en los meses de agosto a diciembre del 2022, con el objetivo de estudiar la micorrización y el contenido de metales pesados en cultivos de cacao en sistemas agroforestales en San Martín, siendo una investigación de tipo no aplicada y de nivel correlacional. Los resultados correspondiente al porcentaje de colonización micorrízica y concentración de cadmio en muestras de raíz y granos de cacao no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos con respecto al cultivo de cacao asociados a diferentes sistemas agroforestales; sin embargo, la concentración de cadmio en suelo y hojas mostraron diferencias significativas entre tratamientos; donde el T3 (Cultivo de cacao + Policultivo) presentó la menor concentración con 0,61 ppm de cadmio en el suelo, mientras que el T1 (Cultivo de cacao + Guaba) obtuvo la mayor concentración de cadmio en hojas con 4,6 ppm, el porcentaje de colonización micorrízica en las raíces de cacao mostró una correlación media positiva con la variable pH del suelo y una correlación media negativa con la variable de concentración de fósforo en el suelo, finalmente se observó una correlación positiva moderada entre la concentración de cadmio del suelo y las variables edáficas (MO y P), mientras que se encontró una correlación moderadamente negativa entre la concentración de cadmio en raíces y hojas y la variable de pH del suelo, asimismo, en la concentración de cadmio en granos de cacao presentó una correlación negativa media a moderada con las variables edáficas (fósforo (ppm), % MO y pH).

Palabras clave: Colonización micorrízica, suelo, correlación.

ABSTRACT

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

This research was carried out in 3 cocoa locations in the province of Lamas and within the facilities of the Laboratory of Plant Tissue Cultures of the Faculty of Agricultural Sciences of the (UNSM) from August to December 2022. The objective was to study mycorrhization and the content of heavy metals in cocoa crops in agroforestry systems in San Martin, being a non-applied and correlational research. The results corresponding to the percentage of mycorrhizal colonization and cadmium concentration in cocoa root and bean samples did not show significant differences between treatments with respect to cocoa cultivation associated with different agroforestry systems, The concentration of cadmium in soil and leaves showed significant differences between treatments; where T3 (cocoa crop + polyculture) presented the lowest concentration with 0.61 ppm of cadmium in soil, while T1 (cocoa crop + Guaba) obtained the highest concentration of cadmium in leaves with 4.6 ppm, the percentage of mycorrhizal colonization in cocoa roots achieved a positive mean correlation with the soil pH variable and a negative mean correlation with the variable phosphorus concentration in soil. Finally, a moderate positive correlation was observed between soil cadmium concentration and edaphic variables (OM and P), while cadmium concentration in roots and leaves showed a moderate negative correlation with soil pH, and cadmium concentration in cocoa beans showed a medium to moderate negative correlation with edaphic variables (phosphorus (ppm), % OM and pH).

Keywords: Mycorrhizal colonization, soil, correlation.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

En gran parte del mundo, el cultivo de cacao es de gran importancia ya que tiene un aumento progresivo de producción durante los últimos años, según (International Cocoa Organization, [ICCO], 2019). Mientras que, en nuestro país presenta una distribución muy representativa en la región San Martín, la cual concentra el 38 % del área de producción nacional. Asimismo, nuestro país se mantiene dentro de los 10 primeros productores de cacao en grano y también se mantiene en el segundo puesto en producir cacao orgánico, contando con más de 100 000 familias que se enfrescan en la siembra de este cultivo. Entre el 50 % y el 75 % del cacao se exporta en forma de grano, que representan el 7 % de la producción internacional (López et al., 2020).

A lo largo del tiempo el cultivo de cacao, se expuso a contaminantes que dañan la salud humana por su alta presencia de metales pesados como son el cadmio, plomo y níquel. El consumo del chocolate derivado de las semillas del cacao, con presencia de una elevada concentración de cadmio, provoca una acumulación de este metal en el organismo, llegando a ocasionar malestares y enfermedades dañinas que arriesgan la salud del ser humano (Jiménez, 2015). Este metal pesado (cadmio) no tiene un aporte significativo para el bienestar del ser humano, ya que provoca malestar en todo el cuerpo; de tal manera que tiene un efecto dañino contra los riñones, los pulmones y los huesos (Meter et al., 2019).

Las plantas absorben el cadmio a través del sistema radicular hasta llegar al xilema, donde se traslada a las hojas y finalmente entra a los granos. Los factores que inhiben la absorción de cadmio por las plantas de cacao incluyen: el ciclo de vida de la planta, su nutrición y la variación debido a los diferentes genotipos de este (Meter et al., 2019).

El cultivo del cacao es capaz de adquirir, transferir y acumular cadmio en el fruto (Gramlich et al., 2018); por lo tanto, si los cultivos se cultivan en suelos que contienen cadmio, es posible que se encuentren trazas de este metal en el grano, como es el caso de Perú (Arévalo-Gardini et al., 2017). La cantidad de cadmio permitida en el chocolate es de 0,8 a 0,9 miligramos por kilogramo. No obstante, en otras regiones del norte como son Piura, Tumbes, San Martín, la concentración de la mayoría de productos derivados del cacao son mayores, por lo que la ciudadanía puede verse perjudicada (Gonzales, 2023).

Asimismo, el cadmio es contemplado uno de los metales que mayores obstáculos crea al desarrollo fisiológico de las plantas y cambia los factores biológicos del suelo en los

microorganismos y hongos micorrízicos, provocándoles uno de los mayores estreses bióticos (Krishnamoorthy et al., 2015).

Desde años atrás la (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2010), da a conocer que los altos contenidos de cadmio (mayores a 0,5 ppm), dificulta el transporte de nuestros productos nacionales agrícolas fuera del país. Sin embargo, se actualizó posteriormente donde la (Unión Europea [UE], 2014) estableció los nuevos límites autorizados para el metal pesado del cadmio en la semilla del cacao y sus derivados, fijándose en 0,1 a 0,8 $\mu\text{g g}^{-1}$ de cadmio que fue aplicada desde el 2019. Los parámetros establecidos referente a la aceptación del cacao en bajas concentraciones del cadmio fue una restricción para su distribución tanto en importación y exportación afectando a los pequeños cacaoteros para su comercialización.

Ante este problema, encontramos diversas investigaciones donde se menciona que algunos microorganismos como los hongos, que ayudan a la formación de micorrizas arbusculares, son cruciales para los procesos de fitorremediación, fitoextracción y fitoestabilización de metales en suelos contaminados por cadmio (Ibarra, 2022). De acuerdo con Zarei et al. (2028), en su información nos muestra que diversas especies de plantas presentes en sitios contaminados con metales y metaloides están habitualmente colonizadas por hongos micorrízicos arbusculares, esto es un indicativo del papel central en la atenuación de estrés por metales pesados en las plantas. El mecanismo utilizado por los hongos micorrízicos en sitios contaminados con metales es la fitorremediación, que desempeña un papel en la fitoextracción y la fitoestabilización (Ibarra, 2022).

Asimismo, Schneider et al. (2016), evaluaron los efectos de los hongos micorrízicos arbusculares en la solución suelo con gran concentración de cadmio y otros metales pesados, porque apoya la propuesta de estrategias para reducir el impacto al suelo en los agroecosistemas, ya que los HMA aumentan la resistencia de las plantas a los metales pesados del suelo, aliviando el estrés que limita su crecimiento fisiológico, especialmente el provocado por este metal.

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

pesados por las plantas y el suelo mediante la inmovilización de metales (Ferrol et al., 2016 y Wang, 2017).

De acuerdo a lo anterior, existe necesidad de buscar soluciones para reducir el estrés que causa el cadmio en la solución suelo, dado que el cultivo del cacao en el departamento San Martín tiene mayor importancia social y económica. Por ello se planteó como objetivo general; Estudiar la micorrización y el contenido de metales pesados en cultivos de cacao en sistemas agroforestales en la región San Martín para generar metodologías y tecnologías que sean de utilidad para los productores de cacao en el mejoramiento del suelo y la reducción de la concentración de cadmio en soluciones de suelo, granos de cacao y partes morfológicas de las diferentes variedades del cultivo

Mediante la ejecución de los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la correlación entre la colonización micorrízica y los sistemas agroforestales con cacao en la provincia de Lamas, región San Martín.
- Determinar la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao en la provincia de Lamas, región San Martín.
- Evaluar la correlación entre la colonización micorrízica y las características del suelo (pH, materia orgánica y fósforo) en plantaciones de cacao en la provincia de Lamas, región San Martín.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Irigoin y Trigos (2022), estudió “los efectos de las interacciones existentes entre las propiedades físicas y químicas de las soluciones del suelo sobre la presencia de cadmio y la colonización micorrízica en plantaciones de cacao en la región San Martín”; para este estudio trabajó con “clones de cacao (CCN-51 e ICS-39) en sistemas de monocultivo” establecidos entre 9 y 12 años en cuatro altitudes (329, 532, 702 y 905 m.s.n.m.). El proceso consistió en utilizar 500 g de la solución suelo para colonización y micelio micorrízica; además, utilizaron 2 000 g de la solución suelo y 1 500 g de semilla de cacao con mucílago para realizar los estudios de cadmio. Encontraron una concentración significativamente diferente de Cd de 1,88 y 1,35 mg/kg correspondientemente para las altitudes de 329 y 532 m.s.n.m., mientras que para los análisis de cadmio en semillas de cacao indicaron mayores concentración en altitudes de 532 y 905 m.s.n.m., con valores de 1,80 y 1,65 mg/kg correspondientemente. Correspondiente a las colonizaciones tuvieron mayores porcentajes las altitudes de 702 y 905 m.s.n.m. con 71,32 y 71,44 %; respecto a la longitud de micelio tuvieron mayor desarrollo en “altitudes de 702 y 905 m.s.n.m., valores de 14,58 y 14,77 cm, correspondientemente”. Los autores llegaron a la conclusión que las concentraciones de cadmio en raíces y semillas de cacao en algunos tratamientos lograron superar el límite máximo permisible, causando preocupación para el bienestar del ser humano.

Asimismo, Vallejos-Torres et al. (2022), estudiaron los “efectos de la diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) de distintas provincias de la Amazonía peruana en la absorción de cadmio y en el crecimiento vegetativo del cacao en condiciones de vivero”. Para ello, inocularon a las semillas germinadas con 1 500 esporas de HMA, utilizaron un sustrato establecido de arena y tierra agrícola a razón de 5:2 y dos porcentajes de Cd (0 y 5 mg/kg). Los parámetros que analizaron fueron la altura, área foliar de la planta, colonización y micelio de HMA. Los resultados obtenidos en la provincia de Mariscal Cáceres sobre los efectos del HMA fue mayor crecimiento de altura y área foliar de la planta; en la provincia de Lamas obtuvieron un alto porcentaje para mitigar el cadmio en la solución suelo; por tal motivo, los investigadores concluyeron informando que los diversos consorcios de HMA pueden mitigar la asimilación de los metales pesados y al mismo tiempo mejorar los factores de crecimiento fisiológico del cacao.

En las investigaciones de Mendoza-López et al. (2021), sobre el “nivel de concentración del cadmio en el cultivo de cacao en la provincia de Lamas, Perú”. Recolectaron partes de las plantas de cacao (hojas, granos) y muestras de suelo de las áreas cacaoteras que se encontraban a altitudes de 400, 600 y 800 m.s.n.m. En los resultados encontraron que las altitudes de 600 y 800 m.s.n.m. lograron superar los parámetros establecidos de aceptación de cadmio; por ello, se buscó solucionar mediante factores bióticos. En conclusión, los autores recomendaron el uso de HMA para disminuir la absorción de estos metales pesados y evitar su distribución por toda la planta, especialmente en los granos de este cultivo.

También Oliva et al. (2020), estudiaron “la absorción de cadmio en plantas nativas de cacao dentro de la provincia de Bagua, Perú”. Sacaron muestras de las raíces, hojas, granos de cacao y muestras de suelo de 29 parcelas agrícolas. Según los resultados del análisis, la cantidad de cadmio en el suelo fue de 1,02 y 3,54 mg/kg, respectivamente, y la cantidad de cadmio en raíces fue 5 veces mayor que en la solución suelo, así como la cantidad de cadmio en las raíces superó la cantidad de cadmio en los granos del cacao en 2,85 veces más.

En las aportaciones de Palao y Saavedra (2020), donde “evaluaron la concentración de Cd total y disponible en el suelo, se analizó la capacidad de colonización de HMA, se determinaron los parámetros fisicoquímicos del suelo y se analizaron los parámetros biométricos de las plantas de cacao”. Para lo cual, utilizaron un diseño estadístico DCA de 5 x 4 “(5 tratamientos, 4 repeticiones) en el cual, cada tratamiento tuvo dos unidades experimentales UE, siendo una totalidad de 40 UE”. De acuerdo a los análisis estudiados y obtenidos encontraron que a mayor dosificación de esporas de HMA mayor resultado en la mitigación de los metales pesados, también tuvieron mejores resultados en los parámetros de la altura de la planta, biomasa seca, mayor % de colonización micorrízica en las raíces; mientras que en los tratamientos T0 y T1 no existió muestras de mejoramiento en el desarrollo fisiológico y no hubo un descenso en la asimilación de cadmio, por el hecho de haber sido inoculados con HFMA.

En investigaciones de Sandoval et al. (2019), sobre “la comunidad local de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) que estuvieron presentes en las raíces del cacao”. Para lo cual recolectaron 2 tipos de concentración de Cd en el suelo; de baja 0,1 mg/kg y de alta 20,9 mg/kg. En los resultados encontraron alto porcentaje de HFMA como (*D. spurca*, *Rhizoglyphus* sp. y *C. etunicatum*) que son resistentes al estrés que causa el cadmio.

En aportaciones de Pérez et al. (2019), estudiaron “la absorción de cadmio del cacao en comparación con los hongos micorrízicos arbusculares para determinar su potencial uso como fijador de cadmio tanto a mediano como a largo plazo”. En los resultados encontraron que el cadmio tuvo fácil distribución en todas las partes de la planta sin presencia de los HFMA; en cambio, las plantas inoculadas con hongos formadores de micorrizas arbusculares tuvieron efectos positivos al mitigar la asimilación de metales pesados en las plantaciones del cultivo.

En otro estudio realizado en el trópico ácido por Jácome, (2018), encontró que cuando existían mayores cantidades del cadmio en los suelos y eran de origen antrópico, el factor biótico y los hongos, podían modificar la disponibilidad o translocar los metales pesados hacia la planta. Además, con el uso de los análisis fisiológicos y químicos de la conglomeración de metales pesados en los órganos de la planta, hoja, área foliar, el fruto y de la solución suelo, disminuyó las inoculaciones de hongos micorrízicos arbusculares mejorando la actividad fotosintética de la planta.

Por otro lado, Gramlich et al. (2017), investigaron los efectos de la asimilación de cadmio en sistemas tradicionales del cacao (monocultivo) y sistemas agroforestales (manejo orgánico) en Bolivia. Para ello, recolectaron hojas, raíces, frutos y solución suelo de los dos tipos de sistemas establecidos en el cultivo. Los resultados demostraron que en el sistema agroforestal existió bajas concentraciones de cadmio en comparación al sistema convencional. Los investigadores concluyeron explicando las posibles causas de una menor cantidad de cadmio en las hojas de las plantas que es consecuencia de la competencia de otras plantas por la absorción de estos metales pesados, y también por la capacidad de absorción específica de cada variedad de cacao.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Generalidades del cultivo de cacao

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) es conocido como alimento de los dioses, es dicotiledónea de característica caulíflora ya que fabrica sus flores y frutos en los tallos y ramas (Romero, 2016). Además, González et al. (2012), menciona que el cacao de forma genética está dividido en tres agrupaciones: los criollos, los forasteros y los trinitarios.

2.2.2. Origen

De acuerdo con Quiroz (2022), informo que el género *Theobroma* es originario del Nuevo Mundo, donde se cree que la cuenca del Amazonas es el lugar de origen del cacao desde México hasta Perú, y también se ha expresado la presencia de dos

subespecies distintas denominadas criollos y forasteros. La primera subespecie proviene de Centroamérica y la segunda proviene del bajo Amazonas y cada una se desarrolla de forma independiente.

2.2.3. Taxonomía

Por su parte Dostert (2011), describe al cacao de acuerdo a “la siguiente clasificación:

División	: Fanerógamas
Clase	: Angiospermas
Subclase	: Dicotiledónea
Orden	: Malvales
Familia	: Malvaceae
Género	: <i>Theobroma</i>
Especie	: <i>Theobroma cacao</i> L.” (p. 25)

2.2.4. Descripción botánica

Según Venturo (2017), menciona que el cacao se caracteriza por tener 20 cromosomas, por lo que es diploide; puede alcanzar una longitud de 20 metros o menos de 8 metros; es anual y se considera perenne; y crece en los bosques de América del Sur. Asimismo, García (2004), informo que los frutos de *Theobroma cacao* L. son de diversos tamaños y formas, alcanzando hasta 30 cm de largo y 10 cm de diámetro. Además de tener formas ovaladas o ligeramente alargadas, tiene una piel gruesa y coriácea que, según la variedad sembrada, se vuelve roja, amarilla, violeta o marrón al madurar.

2.2.5. Variedades de cacao

Por su parte Gonzales (2016), mencionó que el cacao posee 3 variedades: la variedad criolla tiene origen en la selva norte y se estima como una de las variedades más primitivas, el cacao Forastero es más común y representa el 90 % de los granos de cacao del mundo, mientras el cacao Trinitario, por otro lado, es una mezcla de variedades criollas y forasteras.

Criollo

Son conocidos por su aroma como cacao fino (Egas, 2010). Presenta típicamente mazorcas de color rojo o amarillo, el exocarpio del cacao tiene como surcos terminados en punta. Por otra parte, las semillas de cacao tienen tonalidades de púrpura claro hacia un color blanco, también tienen un buen grosor y son muy llenas. En general, se estima

que los granos de cacao criollo tienen un sabor más suave que otras variedades (Zhang et al., 2009).

Forastero

El cacao amazónico y/o amargo proviene de su origen en América del Sur, en particular en la mitad de la cuenca del Amazonas (Arciniegas, 2005). Asimismo, es productivo, resistente a la sequía y resistente a las plagas y enfermedades (González et al., 2012). Ocupa alrededor del 80 % del área de producción mundial y se caracteriza por una alta productividad, pero de baja calidad (Cevallos, 2011).

Trinitario

Es originario de la Isla de Trinidad y Tobago, éste es producido por el cruzamiento de dos variedades que son el criollo con otras variedades criollas provenientes de la Cuenca del Orinoco, toma posesión del 10 al 15 % de la producción mundial. Dentro de estos materiales se halla el clon CCN51; una de las características resaltantes de este producto es la alta producción, también es resistente a enfermedades y patógenos, con distinto aroma al que posee el nacional (Viera, 2011).

Clon CCN-51

De acuerdo con Espinosa et al. (2006), da a conocer de este clon, llamado CCN-51, tiene el mayor potencial de rendimiento y capacidad de resistir enfermedades. El clon CCN-51 es una opción viable de producción debido a sus características. Este producto dispone de una fermentación única, el cual tiene como finalidad mejorar la calidad del producto final, el cual está expuesto a la intemperie como a una mayor cantidad de población. Además, obtiene buenos resultados en la producción con un buen manejo agronómico, el cual llega a producir mayor a 4 000 kg de semillas secas/ha.

Clon ICS-95

El clon ICS-95 es una variedad clonal más usada por su increíble rendimiento, de tal manera que es nominado como los más valerosos, por su alto rendimiento en la mayoría de los suelos y por ser muy vigoroso en Trinidad. Además, uno de los clones más pequeños de ICS, ICS-95, se ha introducido en varias naciones para su uso como matriz de valor en programas de mejoramiento (Barona, 2009).

2.2.6. Altitudes de crecimiento del cacao

Generalmente el cacao es cultivado en altitudes menores de 1 400 m.s.n.m. en los diferentes tipos de selva existentes en la parte sur de América. Este cultivo requiere

temperaturas medias para su rápido desarrollo vegetativo, de tal manera que no es adaptable a temperaturas bajas; la planta de cacao tiene cierto límite al tolerar bajas temperaturas lo cual es no menor de 21 °C y por lo tanto no alcanzará un óptimo desempeño en la parte productiva y dificultará su mantenimiento en las etapas de podas, manejo de enfermedades y abonamiento (Coronado, 2009).

2.2.7. Usos del cacao

El cacao tiene múltiples usos, Gonzales (2016), menciona los principales usos son el cacao en polvo, que se utiliza “en la industria alimentaria para fabricar chocolate y aromas de bebidas; el alcohol de cacao, que se utiliza con frecuencia para fabricar alcohol, bebidas, cremas y manteca de cacao, que se utiliza como materia prima para cosméticos y jabones”.

2.2.8. Suelo, características, composición, perfil, tipos

Con respecto a las aportaciones de las características del cacao, menciona MINAG (2004), el cultivo del cacao requiere suelos “ricos en materia orgánica, arcillosos profundos, bien drenados, con un pH de 4 a 7” y con una topografía regular. Sin embargo, un factor que dificulta su crecimiento de la planta, es la escasa materia orgánica existente en la parte superior del suelo, la cual se encarga de estimular biológicamente a la planta. La producción del *Teobroma cacao* L. viene a ser poco rentable cuando existe altas temperaturas en suelos de escasa disponibilidad de nutrientes y que no haya una fertilización oportuna, provocando así bajos rendimientos.

Se estima que este cultivo necesita cinco horas de luz solar para crecer correctamente porque los suelos pobres necesitan más sombra y los suelos ricos necesitan más luz (INTA, 2010). Se desarrolla perfectamente en una topografía donde la pendiente es del 15 %, con buenas prácticas que ayudan a la conservación del suelo y del agua, obteniendo los mejores resultados en la producción. Puede aclimatarse desde suelos muy ácidos con un pH de 4,5 hasta suelos alcalinos con un pH de 8,5, pero tiene un bajo rendimiento (Romero, 2016).

2.2.9. Metales pesados en suelos agrícolas

Por su parte Trujillo (2020), manifiesta que “la presencia de Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn)”, está asociada a las acciones de las personas como fertilizantes artificiales, pesticidas, fungicidas, etc. Sin embargo, se ha descubierto que el magnesio “(Mn), el cobre (Cu) y el zinc (Zn) son los metales pesados necesarios para el desarrollo de varias plantas”. La mayor parte de los metales pesados acaban en las comidas y se acumulan en el cuerpo humano.

De acuerdo con Prieto et al. (2019), informan que los metales pesados son metales que se hallan en nuestro entorno, ya sea de forma natural o como resultado de actividades antropogénicas, y pertenecen a un grupo de metales que presentan altas concentraciones. Este grupo incluye mercurio, arsénico, cromo, talio, plomo y cadmio. Pueden ingresar a los organismos a través de los alimentos y estar presentes en el medio ambiente.

También, Prieto et al. (2019), mencionan que los elementos metálicos que tienen una densidad relativa alta y son tóxicos cuando están presentes en bajas concentraciones se denominan metales pesados. Ejemplos de metales pesados o metales “están incluidos mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl) y plomo (Pb)”. A través del movimiento ingresan a los órganos de los sistemas vivos, como plantas y animales, porque están en los alimentos y dependen de su desplazamiento. Asimismo, Lázaro (2016) menciona que, la actividad enzimática ocurre en el suelo para descomponer la materia orgánica y reciclar nutrientes. Los microorganismos del suelo procesan estos elementos mediante cambios metabólicos con el apoyo de las enzimas (oxidoreductasas e hidrolasas).

2.2.10. Orígenes de la contaminación del suelo por metales pesados

De acuerdo con Wong (2017), menciona que los metales pesados se encuentran en la naturaleza y son tóxicos en altas concentraciones, lo que explica por qué diversas acciones de los seres humanos como las minerías, la fundición y las labores industriales aumentan las concentraciones en el medio ambiente. Según Prieto et al., (2019) indican que no todos los metales pesados desempeñan un papel en los ecosistemas y pueden alterar los cambios biológicos en diferentes organismos. Asimismo, los metales logran ser tóxicos y aglomerarse en los organismos, como el cadmio, mercurio, cobre, etc.

También, Muñoz (2017), hace referencia que, la normativa establece que en la mayoría de los casos el cadmio puede tener concentraciones biológicas siempre superiores a los límites admisibles. El nivel promedio de cadmio en el suelo de cada nación está por encima de los límites máximos establecidos por las leyes nacionales e internacionales. Asimismo, Reyes et al. (2016), dan a conocer que, Debido a las actividades humanas, la presencia de metales pesados en el agua puede ser perjudicial para la salud humana. En investigaciones actuales han evidenciado que muchos vegetales están contaminados con metales pesados como: “mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr)” a raíz de la irrigación de estos cultivos.

2.2.11. Cadmio en el suelo

En sus investigaciones Sánchez (2016), informa en su forma oxidada, el cadmio es un metal pesado altamente tóxico. El zinc y otros metales pesados están presentes en la corteza terrestre. El pH, el potencial redox, el contenido de materia orgánica y la presencia de arcilla y óxidos de hierro son factores que afectan la movilidad del suelo. Asimismo, el autor menciona que, debido a las labores industriales y humanas, encontramos cadmio en el medio ambiente. Puede provocar dificultades de salud en los riñones, huesos y causar cáncer. Es importante seguir las reglas del cadmio y verificar los tipos de alimentos que comemos, incluidas las hortalizas.

2.2.12. Cacao y cadmio

Por su parte Wong (2017), manifiesta que actualmente existe mucha preocupación internacional por la contaminación del cadmio en los suelos y las plantas, especialmente el cultivo de cacao y sus derivados. Estos metales pesados se acumulan fácilmente en el cuerpo humano y causan “enfermedades crónicas como enfermedades renales, osteoporosis, enfermedades cardíacas y cáncer”.

Asimismo, Gonzáles (2016), informa que, por esta razón, debido a las impurezas ambientales presentes en los granos de cacao, los pequeños productores de cacao enfrentan numerosos desafíos en términos de calidad e inocuidad de los alimentos. Dado que la calidad del cacao es importante para los países importadores, los pequeños productores deben cumplir ciertos estándares para poder vender sus productos en los mercados internacionales.

2.2.13. Propiedades físicas y químicas del suelo que perjudican la disponibilidad del cadmio en las plantas del cacao

La disponibilidad de los metales pesados (Cadmio) en los cacaotales está influenciada por diferentes propiedades que ayudan la traslocación en la planta, estas serían la parte química y física existentes en el suelo, de tal manera que estas propiedades puedan moverse a través del espacio y tiempo. Los factores que influyen en la concentración de cadmio en las plantas incluyen el pH, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica, la conductividad eléctrica, el contenido de macro y micro elementos y la presencia de microorganismos (Adriano 2001; Singh et al., 1999; Shahid et al., 2016; S. He et al., 2015).

En relación a la capacidad de intercambio catiónico, un elevado CIC aumenta la superficie de retención de los iones con carga positiva, la cual mitiga la absorción del cadmio en la planta. En cambio, cuando hay bajo CIC, existe elevada competencia por

los sitios de ligación entre los cationes y el cadmio lo que por su parte se libera de las partículas de la solución suelo. En suelos tropicales altamente meteorizados, la mineralogía más común es la arcilla 1:1 y como consecuente la capacidad de intercambio catiónico es menor; por otra parte, las arcillas 2:1 tienen una capacidad de intercambio catiónico muy elevado a comparación de la arcilla 1:1. Además, los aumentos en el pH y el contenido de materia orgánica en el suelo con frecuencia están asociados con una CIC más alta, especialmente en suelos tropicales (Adriano 2001).

Otro factor que influye en las propiedades físicas y químicas es el pH del suelo, constituyendo uno de los parámetros más esenciales que afectan la movilidad, la solubilidad y la biodisponibilidad del cadmio (Adriano, 2001). En las áreas de suelos donde existe un pH bajo (ácido), el cadmio tiende a ser difícil su absorción debido a que debe sujetarse a las partículas (arena, limo, arcilla).

En suelos ácidos, a medida que aumenta el pH, las plantas reducirán la absorción de cadmio (Shahid et al., 2016; Sauvé et al., 2000). Sin embargo, debido a los exudados ácidos que libera las raíces de la planta para mayor solubilidad de nutrientes e iones, pH ambiental desigual, significa que puede haber suelos neutros o alcalinos, lo que permite que el cadmio se acumule en los tejidos de las plantas (Dong et al., 2007).

Si hay un sustrato orgánico disponible, esto facilita la absorción y transferencia del cadmio hacia la planta de cacao. La combinación de materia orgánica y cadmio se caracteriza por una alta CIC, una mayor actividad microbiana y su capacidad quelante (Adriano 2001; S. He et al. 2015).

Además, según Shahid et al. (2016), El impacto de la materia orgánica en las propiedades del suelo puede reducir indirectamente la biodisponibilidad del cadmio. Por otra parte, Sarwar et al. (2010), mencionan que al competir por los sitios de intercambio del suelo y quelarse con compuestos de cadmio, los nutrientes minerales juegan un papel importante en la reducción de la absorción de cadmio. Intervenir sobre estas características es fundamental para desarrollar estrategias de mitigación que reduzcan la asimilación del cadmio en el cacao (Hamid et al., 2019).

2.2.14. El cadmio, biodisponibilidad y biomecanismo de absorción en el suelo

Este metal pesado tiene una gran cantidad disponible en el suelo (mayor a 4 g/cm³), peso atómico y a su vez son dañinos en porcentajes pequeños. Los metales pesados se encuentran libremente por la naturaleza en concentraciones que no afecten a ningún ser vivo ya sean de microorganismo hasta el ser humano. En el ambiente, el cadmio no puede ser reducido o destruido, solo se puede mitigar su absorción hacia la planta.

Algunos son transportados y distribuidos en el ecosistema hasta integrarse a la cadena alimentaria formando complejos solubles (García et al., 2012 y Dwivedi et al., 2011).

Debido a la erosión del material original, el cadmio es uno de los minerales pesados que se encuentran naturalmente en el suelo (Gramlich et al. 2018) o debido a labores humanas como el uso de pesticidas químicos, vertidos de residuos industriales o riego con aguas contaminadas (Lora y Bonilla, 2010; Schneider et al., 2016).

Existe una variedad de formas químicas y físicas de cadmio en el suelo que son biodisponibles para los organismos (Adriano 2001; Singh et al., 1999). De acuerdo con su absorción, la concentración de cadmio puede ser total, intercambiable y cadmio en la solución de suelo. La fracción total del cadmio está conformado por cadmio intercambiable y cadmio no intercambiables. Los iones de cadmio del material intercambiable se han adsorbido en las superficies reactivas de la materia orgánica del suelo, lo que los hace potencialmente accesibles para la absorción de las plantas (Shahid et al., 2016; Pan et al., 2016).

2.2.15. Efectos del cadmio en la salud humana y la planta

Altos niveles de cadmio en las plantas, causan una baja fotosíntesis, baja absorción de agua y como resultado la planta presenta clorosis, se inhibe el crecimiento y por consecuente muere la planta (Yadav, 2010, citado por Jiménez, 2015).

El cultivo del cacao presenta una importante acumulación de cadmio en semillas y hojas, considerando la gran variedad de productos derivados del cacao para consumo humano, es por ello necesario reducir el contenido de cadmio en el producto final (CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, 2015). Por ello, la Organización Mundial del Cacao (ICCO) prohíbe la comercialización de estos productos, el cual esto es medido y aprobado por un parámetro para aprobar la semilla del cacao y por lo cual su valor crítico es de 0,6 mg/kg.

2.2.16. Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales en el cultivo de cacao tienen efectos positivos en el tema de reciclaje de materia orgánica y del cual va mejorar su porcentaje de contenido, el cual va estimular biológicamente a la planta; además, generan grandes cantidades de biomasa, también sirven como almacenes de CO₂ y eficientes liberadores de oxígeno, y también promueven nichos ecológicos que albergan una gran variedad de especies vegetales y animales (Ruiz, 2014). A su vez, ayudan a proteger el suelo porque aportan materia orgánica a través de la hojarasca (de cacao y especies de sombra), aportando nutrientes y así aumenta la fertilidad natural del recurso (Sánchez y Dubón, 2014).

De acuerdo a los estudios realizados en sistemas agroforestales, Singh et al. (2004), mencionan que estos nos brindan la ventaja de formar comunidades microbianas en el suelo que están estrechamente relacionadas con las comunidades vegetales. Por otro lado, (Buyer et al. 2017), mencionan que la combinación de la selección de cultivos de cobertura y los sistemas de gestión agroforestal puede mejorar la salud del suelo y aumentar la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales.

La asociación de cacao con plantas de sombra es de gran importancia, debido a que existe una buena relación y una buena rentabilidad al asociarse con plantas forestales, esto normalmente se realiza en la parte sur de América, ya que representan la mayor parte de producción realizado por los pequeños cacaoteros (Álvarez et al., 2012).

2.2.17. Micorrizas

Asociaciones simbióticas entre raíces de especies vegetales y hongos edáficos, denominados comúnmente como micorrizas. En la actualidad son consideradas como raíces nutricias de la mayor cantidad de especies vegetales (Agrios, 2002). Desarrollando relaciones simbióticas con más del 80 % de plantas de los diversos ecosistemas (Smith y Read, 2008; Brandán de Weht et al., 2013).

2.2.18. Micorrizas arbusculares

Se encuentran dentro de los suelos en forma de esporas y se reproducen libremente a partir como hospedante de una planta; las hifas en germinación crecen en el suelo y buscan las raíces huésped y forman células de unión en la superficie de la raíz cuando se establece contacto entre los simbiontes (Cavagnaro et al. 2014).

Este tipo de micorriza se caracteriza por presentar el crecimiento micelar dentro de las células de las raíces, formando finalmente “dos estructuras: arbusculos y vesículas”. Una característica de estas micorrizas son los arbusculos, que se desarrollan en las células de la corteza de la raíz y forman ramas continuas a partir de las hifas iniciales (Luginbuehl y Oldroyd, 2017). Esta estructura hace que los nutrientes se transfieran entre el hongo y el huésped (Brundrett y Tedersoo, 2018).

Asimismo, Pérez et al. (2019), mencionan que se puede utilizar hongos formadores de micorrizas para reducir la translocación del cadmio hacia la parte aérea, pero esto dependería del tipo de hongo que forma micorrizas. Su investigación descubrió que la integración de los hongos formadores de micorrizas nativos puede reducir la translocación del metal hacia la planta.

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

3.1.1. Ubicación política

Ubicación del campo experimental

El presente trabajo se realizó en 4 zonas de muestreo (3 localidades) productoras de cacao en diferentes sistemas agroforestales ubicadas en la provincia de Lamas y en los ambientes del “Laboratorio de Cultivos de Tejidos Vegetales de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional San Martín (UNSM)”.

a). Ubicación Política:

Sector	:	Parcelas de cacao multiclonal (CCN e ICS)
Distrito	:	Lamas
Provincia	:	Lamas
Departamento	:	San Martín

b). Ubicación geográfica:

Latitud sur	:	06° 24' 52"
Longitud oeste	:	76° 30' 43"
Altitud	:	812 m.s.n.m.m

c). Condiciones climáticas:

Precipitación	:	857 mm/año
Temperatura	:	Max = 32 °C, Min = 19 °C, Prom = 25,5 °C
Altitud	:	812 m.s.n.m.m.
Humedad relativa	:	46 %

3.1.2. Ubicación geográfica

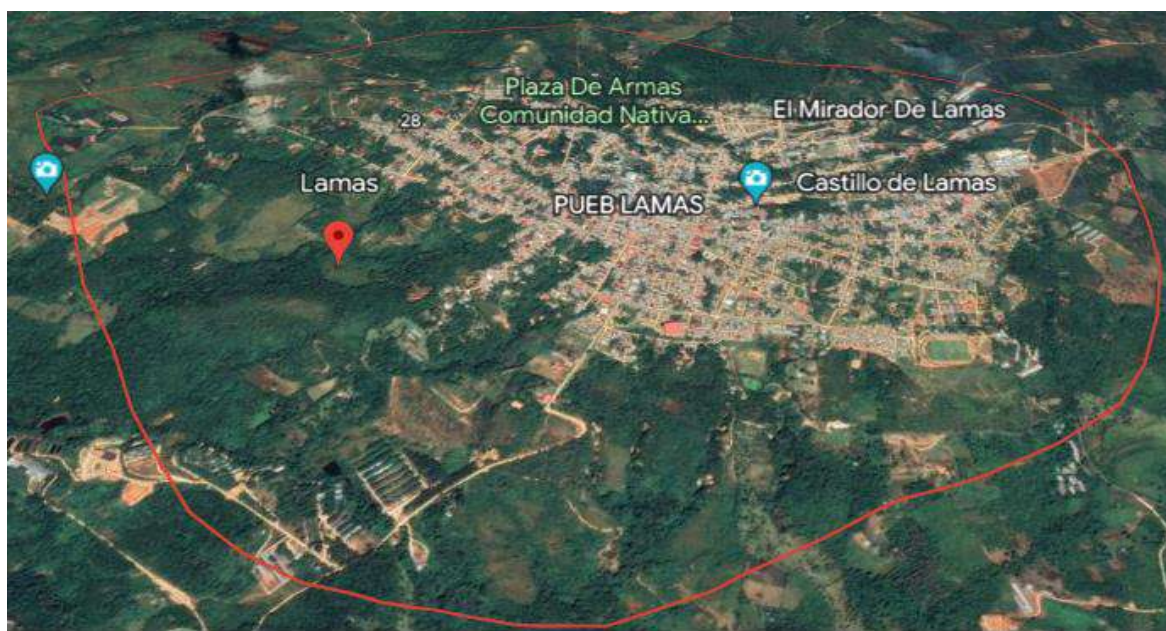


Figura 1

Ubicación geográfica de la provincia de Lamas

3.1.3. Periodo de ejecución

El trabajo de investigación actual se realizó entre agosto y diciembre de 2022.

3.1.4. Autorizaciones y permisos

Este trabajo de investigación no requirió autorización porque no generó ningún impacto ambiental.

3.1.5. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

La investigación actual no causó daño al medio ambiente.

3.1.6. Aplicación de principios éticos internacionales

La Integridad, respeto a las personas, respeto al medio ambiente y justicia fueron los principios éticos generales que se aplicaron en la investigación.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

- a) a1: Sistemas agroforestales con cacao (Cacao + Guaba, Cacao + especies forestales, Cacao + Policultivo y Cacao).
- b) a2: Concentraciones de cadmio (suelos, raíces, foliar y granos).
- c) a3: Colonización micorrízica

3.2.2. Variables secundarias

a) b1: Caracterización de suelos (pH, MO y P)

3.3. Procedimientos de la investigación

❖ Zonas de muestreo

Para el presente trabajo se consideraron **4** zonas de muestreo (3 localidades) productoras de cacao en diferentes sistemas agroforestales ubicadas en la provincia de Lamas (Tabla 1). Dichas zonas de muestreo tenían un área aproximadamente de 1 250 m², dentro de las cuales se consideraron 3 plantas distribuidas al azar para realizar la extracción de muestras de suelo, raíz, hojas y mazorcas de cacao en cada zona.

Tabla 1

Zonas de muestreo y su respectiva composición

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

Leyenda: CP: Cedro Pampa, CG: Cacao + Guaba; SA: San Antonio, CEF: Cacao + especies forestales;

CP: Cacao + Policultivo; T: Tabalosos, C: cacao



Figura 2

Selección e identificación de las zonas de muestreo en las diferentes parcelas de cacao (A), demarcación de las parcelas (B)

Nota: Con la finalidad de seleccionar y demarcar las zonas de muestreo para nuestro trabajo de investigación

3.3.1. Determinación de la correlación entre la colonización micorrízica y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín

❖ Procedimiento para la colonización micorrízica en raíces

- ✓ Primero se procedió a hacer el lavado con agua a las raíces para retirar el suelo adherido, una vez terminado el proceso se colocó las raíces en partes pequeñas en tubos de ensayo de 16 x150 mm con hidróxido de carbono (KOH) al 10 % hasta ser cubierta las muestras por 3 horas para la hidratación de las raíces.
- ✓ Se procedió a efectuar “tinción de las raíces, según la técnica de Phillis y Hayman, (1970)” con modificaciones.
- ✓ Luego estas fueron llevadas a baños maría a 90 °C por 45 minutos con el fin de remover el contenido citoplasmático y clarificar el tejido cortical de las raíces. Pasado el tiempo fueron retirados del baño maria se procedió a agregar agua oxigenada (H_2O_2) de 20 volúmenes por el tiempo de 1 minuto a temperatura ambiente para clarificar los pigmentos de las raíces, posteriormente se retiró el contenido líquido sobrante y se procedió al lavado con agua de dos a tres veces.
- ✓ La técnica de coloración de las raíces utilizada por Phillis y Hayman (1970) se modificó para incluir:

- Adicionar tinta azul Parker (5,7 %) a cada tubo y cubrir la muestra. Dejar reposar durante quince minutos a temperatura ambiente; después, se llevaron a baño maría durante quince minutos más a 90 °C.
 - Con el tiempo, se retiró la tinta excesiva de los tubos y las raíces se enjuagaron con lactoglicerol de dos a tres veces.
 - Al finalizar el proceso, las raíces teñidas se mantuvieron a temperatura ambiente con lactoglicerol hasta su evaluación.
- ✓ Para el proceso de montaje de las raíces en láminas porta objetos, se procedió a vaciar todo el contenido de raíces teñidas de los tubos de ensayo que fueron conservados con lactoglicerol en una placa Petri, la cual se tomó una laminilla porta objeto y con la ayuda de una pinza se montó 20 raíces las cuales fueron (10 raíces por cada campo), cada raíz de 1,5 cm colocando las laminillas cubre objeto delicadamente, para así ser evaluadas en el microscopio a 10x, 20x y 40x de aumento en la que se observó presencia y ausencia de estructuras micorrizas de HMA (figura 3), siguiendo la metodología de Brundrett et al. (1996).

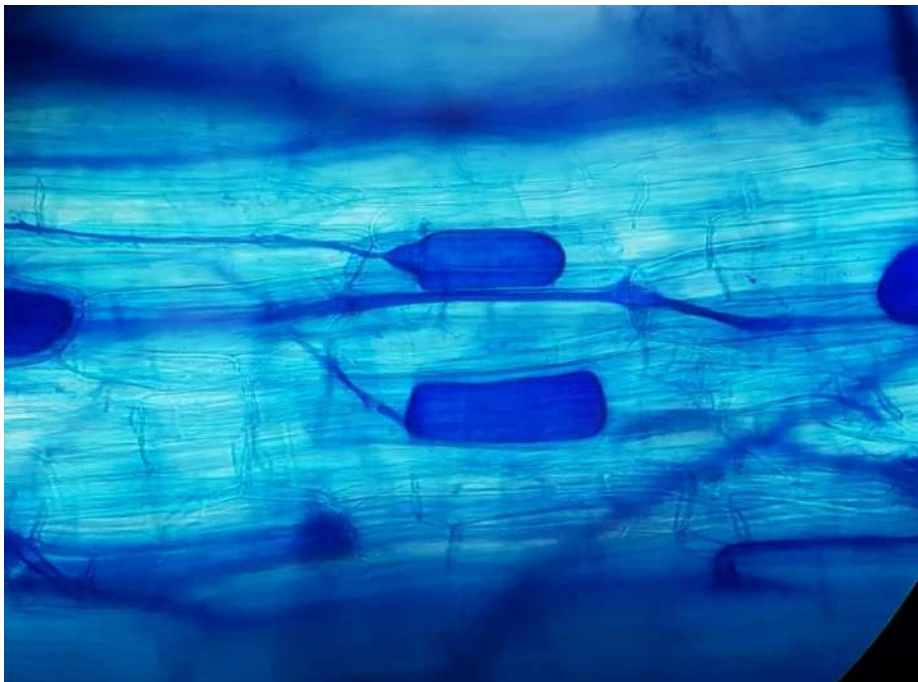


Figura 3

Estructuras micorrísticas de HMA en raíces de cacao evaluadas en el microscopio de la localidad de San Antonio (Cacao + Especies forestales).

❖ Evaluaciones de la colonización micorrízica en raíces

Para la evaluación del porcentaje de colonización se seleccionaron raíces (secundarias y terciarias) de plantas de cacao (Figura 4), luego se utilizó técnicas de tinción que fueron creadas por Phillips y Hayman (1970) con alteraciones; además las muestras estuvieron compuestas por 20 segmentos de raíz (10 raíces por zona), de 1,5 cm de largo, montados en portaobjetos y preparados para evaluación microscópica.



Figura 4

Extracción y selección de raíces secundarias (A) y terciarias (B) de cacao

Nota: Con el fin de realizar la evaluación de porcentaje de colonización micorrízica en los diferentes sistemas forestales asociados al cultivo de cacao

Para realizar el análisis de la colonización micorrízica se procedió a realizar la técnica presentada por Brundrett et al. (1996), que se basó en colocar una porción de la raíz en el campo de visión del microscopio y dividirla en 3 zonas de visión (superior, media e inferior) y ausencia de seda) fueron anotados en el folleto, el proceso se realizó con 20 segmentos montados en portaobjetos de vidrio (figura 5) (Brundrett et al., 1996).

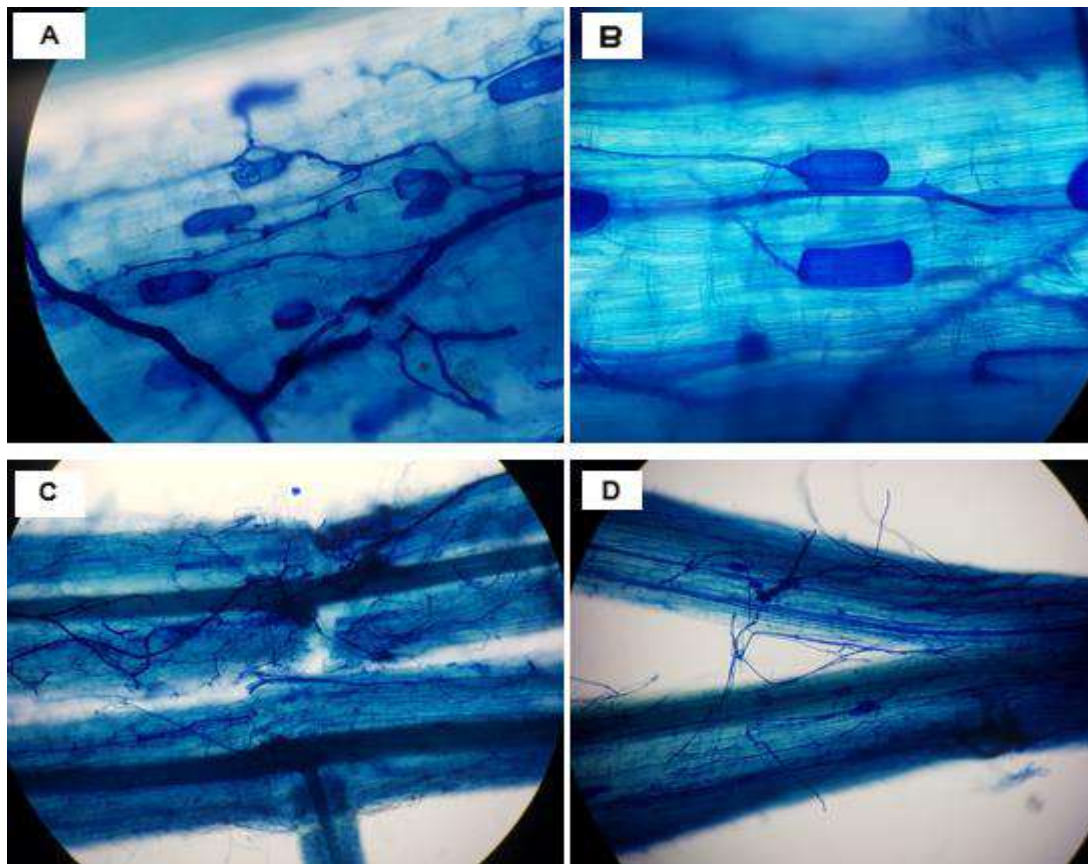


Figura 5

Colonización micorrízica de raíces de cacao de la localidad, (A) Cedro Pampa (Cacao + Guaba, (B) San Antonio (Cacao + Especies forestales) (C) San Antonio (Cacao +) Policultivo, (D) Tabalosos (Cacao)

El grado de colonización de micorrizas de las raíces de las plantas por HMA se calculó utilizando la siguiente fórmula matemática (Brundrett et al., 1996).

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

Donde:

% CM = Porcentaje de colonización micorrízica.

N = Número total de segmentos que se han evaluado.

n = número total de áreas que contienen estructuras micorrízicas

❖ **Diseño de la investigación**

Tipo: Fue de tipo **no experimental**. La investigación no experimental se refiere a una situación en la que el investigador no puede controlar, manipular o cambiar a los sujetos en el transcurso del estudio, mas bien se basa en las interpretaciones u observaciones para extraer conclusiones (Velázquez, 2024).

Nivel: Fue **Correlacional** para determinar su relación entre ellos como el cadmio en suelo, raíces, hojas y granos con las características de los suelos de los cuatro sistemas de producción de cacao, mediante un análisis de comparación múltiple. Un estudio correlacional es una investigación no experimental en el que los investigadores miden dos variables y disponen relaciones estadísticas (correlaciones) entre ellos que permiten sacar conclusiones relevantes sin incluir variables externas (Mejía, 2017).

3.3.2. Determinación de la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín

❖ Determinación de concentración de cadmio

Para los análisis de cadmio de las muestras recolectadas de las raíces como de la solución suelo de las parcelas cacaoteras se dio inicio con el muestreo (Figura 6) el procedimiento se dio antes de aplicar el compost y se procedió a realizar 3 hoyos en forma de “v” a la altura de la copa de cada planta. Teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- ✓ Como método de no contaminar el sustrato se procedió a desinfectar una palana y se demarcó una altura de 20 cm, esto cumple la función de marcar la profundidad deseada.
- ✓ Elaboración de un hoyo en forma de “V”, retirándose luego una capa de suelo de 2 cm a 3 cm de espesor, donde se procedió a cortar en los costados como en la parte superior de la muestra extraída, para eliminar impurezas que dañen la muestra.
- ✓ Cada muestra obtenida constó de 2 kg de suelo/raíces de cada planta muestreada, haciendo un total de 12 muestras.
- ✓ Se procedió a colocar en bolsas de plásticos, bien rotuladas para luego ser transportado al “laboratorio del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT)”.
- ✓ Inmediatamente se procedió a llevar al laboratorio del ICT, allí se homogenizaron y se dejaron secar para ser pesadas y codificadas.
- ✓ El método EPA 3050B se utilizó para determinar el cadmio en las raíces.



Figura

6

Muestreo del suelo para analizar la concentración de cadmio (A) y rotulación de muestras por cada parcela (B)

Nota: Con el fin de determinar las concentraciones de cadmio en el suelo de los diferentes sistemas forestales asociados al cultivo de cacao



Figura 7

Muestreo de raíces para analizar la concentración de cadmio (A) y (B)

Nota: Con el fin de analizar las concentraciones de cadmio en las raíces de los distintos sistemas forestales asociados al cultivo de cacao.

❖ Muestreo en hojas

Cada parcela fue muestreada 3 veces, el procedimiento se realizó recolectando 4 hojas por planta seleccionados de los cuatro puntos cardinales en el centro de la copa, de tal manera se recolectaron 12 hojas por tratamiento (Figura 8), la operación fue repetida por cada uno de los cuatro bloques (Brundrett et al. 1996). Se rotularon adecuadamente para ser llevados al “Laboratorio de Suelo, Plantas, Agua, Fertilizantes y Alimento del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT)-Tarapoto, para examinar la existencia del cadmio en las hojas”.



Figura 8

Muestreo foliar para conocer las concentraciones de cadmio (A), rotulación y separación de hojas por cada parcela muestreada (B)

Nota: Con el fin de analizar las concentraciones de cadmio en las hojas de los distintos sistemas forestales asociados al cultivo de cacao

❖ Muestreo de granos de cacao

La recolección consistió en seleccionar 12 frutos de cacao por cada uno de las variables, estas muestras se les mezclaron con la finalidad de conseguir una sola muestra bien homogénea y representativa (Figura 9). Luego se procedió a realizar las siguientes labores:

- ✓ Se depositó los granos de cacao en bolsas plásticas con la finalidad de no contaminar la muestra con otros metales pesados. Luego se procedió a amarrarlas y dejarlo fermentar por tres días.
- ✓ Posteriormente, las muestras se secaron bajo sombra en un ambiente cerrado donde no se podía contaminar. Finalmente, las muestras fueron embaladas en sobres de papel, codificadas y enviadas al laboratorio de ICT para su análisis de cadmio.

- ✓ De cada muestra compuesta se seleccionaron 3 submuestras o repeticiones para realizar el análisis correspondiente.

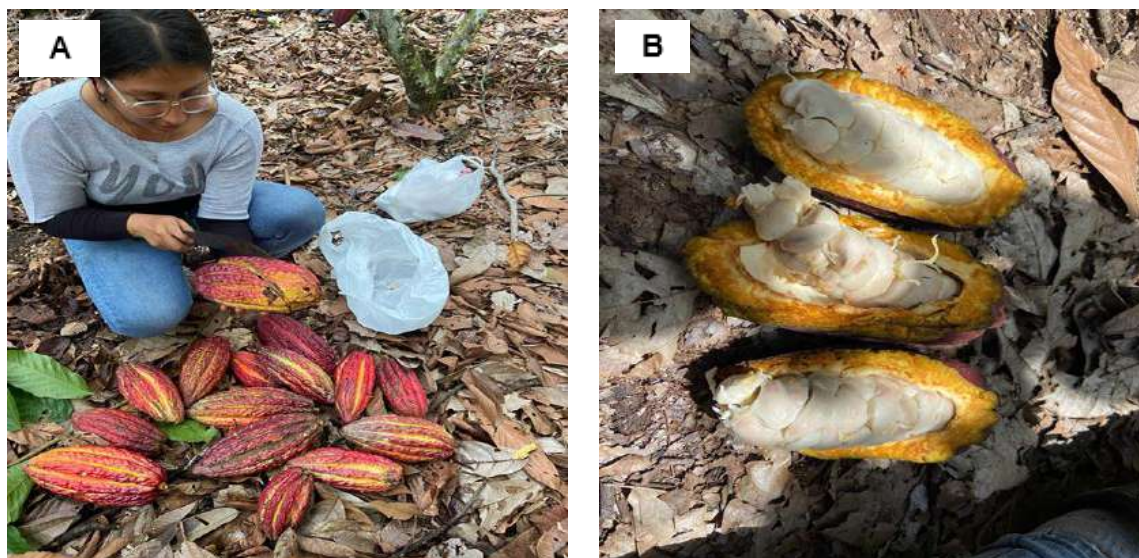


Figura 9

Muestreo de granos de cacao para conocer la concentración de cadmio (A) y revisión de frutos sanos (B)

Nota: Con el fin de conocer las concentraciones de cadmio en los granos del cacao de los diferentes sistemas forestales asociados al cultivo

Para el cálculo de la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao en el departamento de San Martín se utilizó la siguiente fórmula:

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

Donde:

% CM = Porcentaje de concentraciones de cadmio.

N = Número total de segmentos que se han evaluado.

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

3.3.3. Evaluación de la correlación entre la colonización micorrízica y las características del suelo (pH, materia orgánica y fósforo) en plantaciones de cacao en la región San Martín

Análisis de caracterización de suelo

Se realizó 8 muestras de suelos (dos submuestras por tratamiento) para el análisis de caracterización de suelos, colectado a una hondura de 20 cm (Figura 10). El pH se determinó utilizando un potenciómetro de suspensión de suelo-agua-relación 1:2,5 y el método de extracción de OLSEN modificado se utilizó para determinar el fósforo. El método de WALKLEY y BLACK encuentra $\text{Na HCO}_3 = 0,5\text{M}$, pH 8,5 y materia orgánica (Brundrett et al., 1996).



Figura 10

Muestreo de suelo

Nota: Para analizar de caracterización en los diversos sistemas forestales asociados al cultivo de cacao

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la correlación entre la colonización micorrízica y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín

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

Tabla 2

Porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao

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

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

Nota: El cultivo de cacao se aplico en diferentes sistemas forestales de la provincia de Lamas, San Martín

Recientemente Irigoin et al. (2022), encontraron cantidades del Cd en raíces y semillas de *T. cacao*, en algunos tratamientos lograron superar el límite máximo permisible, causando preocupación para el bienestar del ser humano; por otro lado, Rodríguez-Morelos et al. 2014 y Shi et al. 2016 dieron a conocer en su investigación que lograron observar la abundante presencia de micorrizas en las diversas especies vegetales evaluadas.

Asimismo, Rojas-Mego et al. (2014); Tedersoo et al. (2020), evaluaron la incidencia de micorrizas arbusculares en agroecosistemas de cacao y café, reportando una alta asociación de estos microorganismos con el cultivo principal y otras especies vegetales silvestres adyacentes a estos, con lo que determinaron que la presencia de estas especies secundarias son vitales para fase de esporulación de los consorcios micorrizicos nativos y a su vez estos microorganismos facilitan el intercambio de recursos entre las plantas huésped. También, Hiiesalu et al. (2014); Tedersoo et al. (2016), encontraron que la

diversidad de plantas y hongos micorrícicos están relacionadas positivamente en el estudio de diversos ecosistemas.

Por otro lado, un estudio realizado por Prieto-Benavides et al. (2012) mostró los efectos de diversos sistemas agroforestales sobre el porcentaje de micorrización en raíces de cacao, reportando un mayor valor en los sistemas con mejor diversidad de especies vegetales. En los resultados obtenidos en nuestro estudio alcanzamos 96 % de micorrización en el cultivo de Cacao + Especies Forestales y Policultivo (frutales secundarios) y finalmente en el testigo (Cacao) se alcanzó 94 % de micorrización en raíces del cacao.

4.2. Determinación de la correlación de las concentraciones de cadmio y los sistemas agroforestales con cacao en la región San Martín

Se creó una prueba de normalidad para determinar si había diferencias significativas entre cada variable, y luego se realizó un análisis de varianza y prueba de Duncan. (Tabla 3). La totalidad de datos utilizados en los análisis se muestran en el Anexo 4.

Suelo

Los datos de la variable concentración de cadmio en muestras de suelo obtenidas de parcelas de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales presentó una distribución normal ($p > 0,05$). Se llevó a cabo un análisis de varianza para determinar si había diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$) (Anexo 5).

Para identificar la diferencia entre las variables evaluados se desarrolló la prueba de comparación de Duncan, mostrando variaciones significantes entre Cultivo de cacao + Policultivo y el resto de variables (Tabla 3).

Los valores obtenidos están dentro de rango de 0,61 – 0,79 ppm de cadmio en suelo, siendo el T3 el que presentó la menor concentración de este metal pesado.

Tabla 3

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

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

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

Nota: La solución suelo se extrajo del cultivo de cacao asociada a diferentes sistemas forestales

El Ministerio de Medio Ambiente (2017) mediante “el decreto supremo, DS N° 011-2017” se han formulado normas de calidad del suelo que estipulan que el límite máximo de la aceptación de cadmio, metales pesados en las tierras agrícolas, es de 1,4 microgramos por gramo de suelo. Tomando en cuenta este límite, podemos decir que los suelos estudiados en este trabajo de investigación están en el nivel permitido de porcentaje de Cd en la solución suelo, alcanzando como máximo 0,79 ppm de cadmio en el suelo.

En los últimos años se ha llevado a cabo una evaluación del porcentaje de concentración de cadmio en diferentes niveles altitudinales, por eso en las investigaciones de Mendoza-López et al. (2021), sobre el nivel de concentración del cadmio en los sembríos de cacao en la provincia de Lamas, Perú; encontraron que las altitudes de 600 y 800 m.s.n.m. lograron superar los parámetros establecidos de aceptación de cadmio; por ello, se buscó solucionar mediante factores bióticos. En conclusión, los autores recomendaron el uso de HMA para disminuir la absorción de metales pesados y evitar su distribución por toda la planta, especialmente en los granos del cacao.

De acuerdo con Oliva et al. (2020), en la provincia de Bagua, Perú, investigaron la absorción de cadmio en plantas nativas de cacao. Según el análisis, las cantidades de cadmio en el suelo fue de 1,02 y 3,54 mg/kg, respectivamente, y las cantidades de cadmio en las raíces fue 5 veces mayor que en la solución del suelo, así como las cantidades de cadmio en las raíces superó el contenido de cadmio en los granos del cacao en 2,85 veces más; por otro lado Zambrano et al. (2020), informaron que la aplicación de microorganismos benéficos como los HFMA mejoran los suelos que contienen grandes concentraciones de metales pesados, de tal manera que la colonización de micorrizas arbusculares disminuyen la absorción de estos metales hacia la planta, el cual es recomendado por muchos investigadores que lograron un mejoramiento en el crecimiento vegetativo de la planta de cacao como también lograron mitigar la absorción del cadmio, como también reduce la toxicidad en las plantas hospedantes.

Raíz

La prueba de Kruskal Wallis fue necesaria para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos porque los datos de la variable concentración de cadmio (ppm) en las raíces de cacao no mostraron una distribución normal (Anexo 6).

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

Tabla 4

Concentración de cadmio (ppm) en raíces de cacao

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

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

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

Las concentraciones de cadmio en raíces obtenidas en las variables Cacao + Especies Forestales, Cacao + Policultivo y Cacao fueron los menores valores, pudiendo estar relacionadas con el porcentaje de colonización micorrízica presentados en estos sistemas agroforestales. De acuerdo con Riopedre et al. (2021), mencionó que las micorrizas arbusculares controlan el impacto fitotóxico de este metal pesado al fitoestabilizarlo en las paredes celulares del microorganismo.

Por otro lado, es necesario considerar que la concentración de cadmio encontrado en la raíz estará relacionada con el contenido del elemento en el suelo (Wilquerson, 2017), por lo que se puede observar una mayor acumulación de cadmio en raíces y suelo en la variable (Cacao + Guaba). Asimismo, el contenido del cadmio en el suelo está relacionado con la concentración de cadmio en la raíz (Wilquerson, 2017), por lo que se puede observar una mayor acumulación de cadmio en el suelo y las raíces de la variable (Cacao + Guaba).

Como resultado de esta relación entre la cantidad de cadmio presente en el suelo y las raíces, el valor final puede ser un buen indicador de la presencia de metales pesados en el suelo. Este hecho se debe a la producción de exudados radiculares y el incremento de actividad microbiana por efecto de estos, provocando finalmente una mayor solubilidad y disponibilidad de este metal.

En las investigaciones de Oliva et al. (2020), con la finalidad evaluar el porcentaje de concentraciones de cadmio en las diversas partes de la planta como también en la solución suelo que se encuentran en la provincia de Bagua-Perú; obtuvieron como

resultados gran porcentaje de cadmio en las raíces el cual contenían hasta 5 veces superior de cadmio en la solución suelo; asimismo Palao y Saavedra (2020), realizaron una investigación con la finalidad de analizar la concentración total y disponible de cadmio en el suelo, la capacidad de colonización de HMA, los parámetros físicos y químicos del suelo y los parámetros de las propiedades biológicas de las plantas de cacao y como resultados obtuvieron que a mayor dosificación de esporas de los HMA, mayor fue el porcentaje de colonización micorrízica en las raíces.

Hoja

En los datos de la variable acumulación de cadmio en muestras foliares obtenidas de parcelas de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales presentó una distribución normal ($p > 0,05$). Por ello, Se realizó un análisis de varianza para determinar si había diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$) (Anexo 7).

Para identificar la diferencia entre las variables evaluados se desarrolló la prueba de comparación de Duncan, mostrando variaciones significantes entre (Cultivo de cacao + Guaba), (Cultivo de cacao + Policultivo) y (Monocultivo cacao) (Tabla 5). Los valores obtenidos están dentro de rangos de 1,6 – 4,6 ppm de cadmio en hojas, siendo el Cacao + Guaba el que presentó la mayor concentración de este metal pesado (4,6 ppm) y las variables Cacao + Policultivo y Monocultivo Cacao la menor concentración con 1,8 y 1,6 ppm respectivamente.

Tabla 5

Comparación de Duncan para la variable concentración de cadmio en muestras foliares

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

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

Nota: Se realizó en el cultivo de cacao asociada a diferentes sistemas forestales

Estos resultados son semejantes a lo estudiado por Gramlich et al. (2017), donde mencionó que, en los sistemas agroforestales, las hojas de cacao tienen una concentración de cadmio más baja, debido a la competencia de absorción del metal pesado entre las diversas especies vegetales presentes en el área productiva.

Por otro lado, para mejor control en las evaluaciones para contrarrestar el cadmio es muy necesario realizarlo en vivero y laboratorio, así como nos explica Vallejos-Torres et al.

(2022), donde evaluaron los “efectos de la diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) en la absorción de cadmio y en el crecimiento vegetativo del cacao en condiciones de vivero”. De acuerdo a los resultados obtenidos de la provincia de Mariscal Cáceres respecto a los efectos del HMA, indicaron mayor crecimiento respecto a la altura como área foliar del cacao; concluyendo con la investigación que los consorcios de HMA pueden disminuir la absorción de metales pesados y mejorar los factores de crecimiento fisiológico del cacao.

Granos de cacao

La variable concentración de cadmio en granos de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales presentó una distribución normal ($p > 0,05$). Por ello, “se procedió a realizar un análisis de varianza, determinándose que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$)” (Anexo 8).

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

Tabla 6

Concentración de cadmio (ppm) en granos de cacao

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

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

La planta de cacao tiene una capacidad excepcional para extraer, transportar y acumular cadmio en sus frutos (Gramlich et al., 2018). Estudios realizados por Engbersen et al. (2019) y Oliva et al. (2020) confirman que específicamente los granos de cacao pueden llegar a acumular una mayor concentración de cadmio que la reportada en el suelo.

Teniendo en cuenta que los niveles máximos de concentraciones de cadmio en grano de cacao son de 0,5 mg/kg (Contreras et al., 2011 y Tantalean et al., 2017), con el mayor grado de acumulación en granos, seguido por la cáscara de frutos y las hojas (Chávez et al., 2015).

Analizando los resultados de nuestra investigación, notamos que la variable (Cacao + Policultivo) presentó una mayor acumulación de cadmio en el suelo y granos (0,76 ppm).

Por otro lado, la variable (Cacao + Especies forestales) mostró el menor valor de cadmio en granos (0,43 ppm) por debajo del límite establecido.

Esta diferencia observada en relación de almacenamiento de cadmio en los granos de cacao en los tratamientos estudiados, se debe a una mayor diversificación de especies forestales asociadas al cultivo de cacao. Por otro lado, se ha estudiado que las especies vegetales proporcionan una adición de materia orgánica, incrementan el nitrógeno en el suelo, reducen la pérdida de suelo, aumentan la biomasa radicular, incrementan las sustancias promotoras del crecimiento y asociaciones microbianas (Iglesias, 2011).

Es así como las especies asociadas al cultivo de cacao pueden afectar la imbibición de cadmio de los suelos, disminuyendo la cantidad acumulado en los diferentes órganos vegetativos de la planta de cacao (Gramlich et al. 2018; Argüello et al. 2019). Por esta razón se han efectuado investigaciones de biorremediación en áreas contaminadas por este metal pesado, mediante la revegetación con una mayor diversidad de especies vegetales (Liu et al., 2017).

4.3. Evaluación de la correlación entre la colonización micorrízica y las características del suelo (pH, materia orgánica y fosforo) en plantaciones de cacao en la región San Martín

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

Tabla 7

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

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

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

Las variables de pH del suelo tienen una correlación media positiva con el grado de colonización micorrízica ($r = 0,464$). Sin embargo, muestra una correlación media negativa entre la cantidad de fósforo presente en el suelo, lo cual significa que, una

menor concentración de fósforo (P) en el suelo, las raíces de cacao, presentaran una mayor existencia de estructuras micorrízicas ($r = -0,424$).

De acuerdo con Oliva et al. (2020), evaluaron la absorción de cadmio en los árboles de cacao nativos en tierras agrícolas del Perú, donde encontraron un gran porcentaje de cadmio en las raíces el cual contenían hasta 5 veces superior de cadmio en la solución suelo. De tal manera que concluyeron que la gran mayoría de las fincas superan los índices establecidos para la aceptación de comercialización de cadmio y también para realizar su derivado principal que es chocolate.

Con lo cual podemos explicar el alto porcentaje de micorrización en raíces de cacao obtenidos en nuestra investigación, teniendo valores de pH de suelo de 5,8 – 7,1, considerado como ligeramente ácido a neutro. Trabajos similares realizados en el cultivo de sachá inchi, mostró una correlación moderada positiva ($r = 0,57$) entre el grado de colonización micorrízica (%) y el pH del suelo (De la Sota, 2023). Además, según Shahid et al. (2016), el impacto de la materia orgánica en las propiedades del suelo puede reducir indirectamente la biodisponibilidad del cadmio.

Los sistemas agroforestales en el cultivo de cacao tienen efecto positivo en el tema de reciclaje de materia orgánica y del cual va mejorar su porcentaje de contenido, el cual va estimular biológicamente a la planta; además, generan grandes cantidades de biomasa, además de servir como almacén de CO₂ y eficientes liberadores de oxígeno, y al mismo tiempo promueven nichos ecológicos para una gran variedad de especies vegetales y animales (Ruiz, 2014); además, contribuyen a la conservación del suelo ya que agregan materia orgánica a través de la hojarasca (de cacao y especies de sombra), ayudando a suministrar nutrientes y aumentando así la fertilidad natural del recurso (Sánchez y Dubón, 2014).

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

Los valores del coeficiente de correlación de Pearson se muestran en la Figura 11, donde los valores superiores a 0,5 indican un nivel medio a alto. Para este caso, las variables de respuesta son las concentraciones de cadmio en el suelo, la raíz, las hojas y los granos de cacao, mientras que las variables independientes son las características fisicoquímicas del suelo, como el pH, la materia orgánica y el fósforo.



Figura 11

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

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

Concentración de cadmio en el suelo

Las variables materia orgánica y cantidad de fósforo en el suelo tienen una correlación positiva moderada a alta con la concentración de cadmio en el suelo (ppm) ($r = 0,72$ y $r = 0,59$). Lo cual significa que en los suelos con una alta concentración de fósforo y materia orgánica se encontró también una mayor concentración de este metal pesado.

Esta relación entre las variables se puede observar en las variables (Cacao + Especies forestales) y variables (Monocultivo de cacao) (Anexo 9), mostrando porcentajes promedio de materia orgánica de 4,97 y 6,74 y concentraciones promedio de fósforo de 4,11 y 6,29 ppm respectivamente, siendo estos los mayores valores obtenidos (Anexo 4).

Concentración de cadmio en raíces y hojas

La correlación negativa moderada entre la variable pH del suelo y la concentración de cadmio en las raíces y hojas de cacao (ppm) es negativa ($r = -0,64$ y $r = -0,67$). Lo cual

significa que el pH del suelo tiene una relación inversa con la concentración de cadmio (ppm).

Se observó que la variable (Cacao + Guaba) mostró el menor valor promedio en comparación con los demás tratamientos ($\text{pH} = 5,88$) en el pH del suelo (Anexo 9). El mayor valor promedio de concentración de cadmio en raíces (2,5 ppm) y hojas (4,6 ppm) se encontró en este mismo tratamiento (Anexo 4).

Concentración de cadmio en granos de cacao

Las variables materia orgánica y la cantidad de pH del suelo tienen una correlación negativa moderada a alta con la concentración de cadmio en granos de cacao (ppm) ($r = -0,81$ y $r = -0,76$). Sin embargo, tiene una correlación media negativa con la variable de concentración de fósforo en el suelo (ppm) ($r = -0,43$). La concentración de cadmio en granos de cacao (ppm) tiene una relación inversa con dichas variables en ambos casos.

Teniendo en cuenta los tratamientos evaluados, encontramos que para la correlación negativa moderada y media se observó que la variable (Solo cacao) alcanzo los mayores valores de pH, materia orgánica (%) y fósforo (ppm) en el suelo con ($\text{pH}: 7,12$, $6,74\% \text{ MO}$ y $6,29 \text{ ppm P}$).

Mediante los estudios de Pérez et al. (2019), sobre la absorción de cadmio del cacao en comparación con los hongos micorrízicos arbusculares para conocer su potencial uso como fijador de cadmio a mediano o largo plazo, por lo que confirmaron el mejoramiento del desarrollo vegetativo a la planta de cacao por inocular los hongos formadores de micorrizas arbusculares, también solucionó el estrés que es producido por los metales pesados al ser translocados a la planta de cacao.

La acidez del suelo promueve que el cadmio este presente en la fracción ácida soluble del suelo; mientras que en condiciones alcalinas disminuye la movilidad y solubilidad de este metal (Arévalo-Gardini et al., 2016, Chavez et al., 2016 y Florida et al., 2018).

Además, podemos observar una relación positiva entre la variable materia orgánica y concentración de cadmio en el suelo y una relación inversa con la concentración de cadmio en granos de cacao. Esto nos dice que una mayor acumulación de materia orgánica en el suelo promueve la inmovilización del cadmio, haciéndolo poco asimilable por las plantas e imposibilita su llegada al fruto, acumulándolo en la zona edáfica.

La materia orgánica del suelo sufre un proceso de humificación, generando grupos fenólicos y carboxílicos los que se encargaran de la retención de cadmio, haciéndolo

poco disponible para las plantas (García et al., 2002 y Bravo et al., 2014). Por otro lado, una baja concentración de materia orgánica este asociado a una alta captación de cadmio por las especies vegetales (Argüello et al., 2019; Gramlich et al., 2017).

De acuerdo con Oliva et al. (2020), evaluaron el porcentaje de concentraciones de cadmio en las diversas partes de la planta como en la solución suelo que se encuentran en la provincia de Bagua, Perú; donde encontraron un gran porcentaje de cadmio en las raíces el cual contenían hasta 5 veces superior de cadmio en la solución suelo; también superó un 2,85 veces más en las concentraciones del grano de cacao. De tal manera concluyeron que la gran mayoría de las fincas superaron los índices establecidos para la aceptación de comercialización de cadmio.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en base a los objetivos se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. La variable porcentaje de colonización micorrízica no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos planteados en base al cultivo de cacao asociados a diferentes sistemas agroforestales.
2. Se observó que no existió correlación entre las concentraciones de cadmio del suelo en las variables raíces y granos de cacao en el tratamiento (Cacao + Guaba) con 2,5 y 0,74 ppm, pero sí fueron los mejores promedios que el resto de tratamientos; asimismo, las concentraciones de cadmio en las hojas de este mismo tratamiento sí mostraron diferencias significativas con (4,6) de los demás tratamientos.
3. Se determinó que la variable porcentaje de colonización micorrízica y las características del suelo logró una correlación media positiva en la variable pH del suelo y una correlación media negativa con la variable concentración de fósforo (P) y materia orgánica (MO) en el suelo.

RECOMENDACIONES

De la investigación realizada se recomienda:

1. Ampliar la cantidad de muestreos de raíces para la evaluación de colonización micorrízica, con el fin de conservar datos más exactos de la incidencia de estos microorganismos en este cultivo.
2. Tomar en cuenta las variables climáticas de cada zona de estudio para tener una mayor precisión en el efecto encontrado en las variables edáficas y microbiológicas.
3. Continuar evaluando la correlación micorrízica y las características del fósforo en el suelo en otros lugares de la región, ya que una menor concentración de (P) en el suelo, las raíces de cacao, presentaran una mayor presencia de estructuras micorrízicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Domi C., A. (2001). Trace elements in terrestrial environments biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer, 315-348.
- Agrios, G. (2002). Fitopatología. Limusa 2 edición. México.
- Arciniegas Leal, A. M. (2005). Caracterización de árboles superiores de cacao (*Theobroma cacao* L.) seleccionados por el programa de mejoramiento genético del CATIE. (Tesis de Maestría), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. Pag 1 – 144. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4571/Caracterizacion_de_arboles_superiores_de_cacao.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C. y He, Z. L. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. Ecología Aplicada, 15(2): 81-89. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v15n2/a03v15n2.pdf>
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., y He, Z. L. (2017). Accumulation of heavy metals in cocoa (*Theobroma cacao* L.) leaves and beans in the main cocoa-producing regions of Peru. The science of the total environment, 605-606, 792–800. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717315267>
- Argüello, D., Chavez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., y Montalvo, D. (2019). Total environmental science soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cocoa beans: a nationwide study in Ecuador. Total environmental Science, 649, 120 –1 27. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718332649>
- Álvarez, F, Rojas, J, y Suárez J. (2012). Simulación de arreglos agroforestales de cacao como una estrategia de diagnóstico y planificación para productores. Ciencia y Tecnología Agropecuaria 13(2): 145-150. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624578>
- Barona, V. (2009). Caracterización de clones universales y regionales. Departamento técnico, Colombia. Slideshare, pp 1 – 44. <https://es.slideshare.net/vigobarona/caracterizacion-de- clones>

- Bravo Realpe I. D.S, Arboleda Pardo C. A., y Martín Peinado, F. J. 2014. Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica* 63(2): 164-174.
https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/39569/45757
- Brandán de Weht, C.; Amigo, J. y Weht, S. (2013). Bi and tripartite symbioses: soil microorganisms. *Huayllu-Bíos*, (7), 29. Recuperado de <http://www.exactas.unca.edu.ar/HUAYLLUBIOS/num-7/3.pdf>
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., y Malajczuck, N. (1996). Work with mycorrhizae in forestry and agriculture. *ACIAR Monograph*, 32 – 374. Canberra, Australia. <https://www.aciar.gov.au/publication/working-mycorrhizas-forestry-and-agriculture>
- Brundrett, M.C. y Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal and mycorrhizal symbioses global host plant diversity. *New phytologist*, 220, 1108-1115. doi: 10.1111/nph.14976
- Buyer, J. S., Baligar, V. C., He, Z., y Arévalo-Gardini, E. (2017). Soil microbial communities under agroforestry and cocoa cover crop systems in Peru. *Applied soil ecology*, 120, 273–280.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139317302949>
- Cavagnaro, R. A., Oyarzabal, M., Oosterheld, M., y Grimoldi, A. A. (2014). Detection of biomass production of forage grasses cultivated in response to mycorrhizal symbiosis under conditions of nutritional deficit. *Grassland science*, 60 (3), 178–184. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/grs.12057>
- Cevallos J. (2011). Producción y comercialización del caco en el Ecuador. (Tesis de pregrado), Universidad de Guayaquil. Guayaquil - Ecuador. Pag 1 – 34.
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/1637/1/jos%c3%89%20miquel%20cevallos%20barriga.pdf>
- Chavez, He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R.S., Li, Y. C., Moyano, B., y Baligar, V.C. (2015). Cadmium concentration in cocoa beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Total environmental science*, 533, 205–214. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.106.

- Chavez E, He Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., y Baligar, V. C. (2016). Chemical speciation of cadmium: an approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cocoa production. *Chemosphere* 150, 57 - 62. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.013>
- Chupillón Cubas, J. W. (2017). Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para el establecimiento de plantaciones comerciales. Tesis. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto – Perú. Pag 1 – 75. <https://tesis.unsm.edu.pe/bitstream/11458/2473/1/INFORME%20DE%20TESIS%20-%20Jimmy%20W.%20Chupillon%20Cubas.pdf>
- Codex Alimentarius Commission. (2015). Preliminary draft maximum levels for cadmium in chocolate and cocoa products. Ninth session new delhi, India. <https://www.foodsafetynews.com/2021/05/cadmium-in-chocolate-limits-put-forward-in-codex-meeting/>
- Coronado Jorge, M. F. (2009). Influencia del fermentado, oreado, drenado y frecuencia de la remoción sobre la calidad del grano fermentado de cacao (*Theobroma Cacao*) del clon ics-95 en la zona de Lamas - San Martín. (Tesis de pregrado), Universidad de San Martín. Tarapoto - Perú. Pag, 1 – 111. https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/2219/1/TP_AGRO_00325_2009.pdf
- Contreras, F., Herrera, T., e Izquierdo, A. 2011. Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en suelos de Barlovento, estado de Miranda. *Revista Venesuelos* 13(1), 52 – 63. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/979
- Cornwell, W. K., Bedford, B. L., y Chapin, C. T. 2001. Emergence of arbuscular mycorrhizal fungi in a phosphorus-poor wetland and response of mycorrhizal fungi to phosphorus fertilization. *l'm J Bot* 88 (1), 1824 - 1829. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21669616/>
- Da Silva-Junior, J.P., y Siqueira, J. O. 1997. Aplicación de formononetina sintética al suelo como estimulante de la formación de micorrizas en maíz y soja. *Revista Brasileira Fisiología Vegetal* 9: 33 - 39. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/211072/1/APLICACAO-DE-FORMONONETINA-SINTETICA-....pdf>

- De la Sota Ricaldi, A. M. (2023). Identificación molecular de hongos micorrízicos arbusculares asociados al sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) en la región San Martín. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima – Perú. Pag 1 – 114.
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5629/de-la-sota-ricaldi-ana-maria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dong, J., Mao, W. H., Zhang, G. P., Wu, F. B., y Cai, Y. (2007). Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity: a review. *Plant soil environment*, 193 – 200.
https://pse.agriculturejournals.cz/artkey/pse-200705-0001_root-excretion-and-plant-tolerance-to-cadmium-toxicity-a-review.php
- Dostert, N., Roque, J., Asunción, C., La Torre, M. I., y Weigend, M. (2011). Hoja botánica: Cacao. Primera edición, Lima – Perú. Pag 1 – 20.
<https://repositoriodigital.minam.gob.pe/bitstream/handle/123456789/185/BIV01202.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Douds D., D., Galvez, L., Bécarr, G., y Kapulnik, Y. 1998. Regulation of arbuscular mycorrhizal development by host plant species and fungi in alfalfa. *New phytologist* 138: 7 - 35.
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1469-8137.1998.00876.x>
- Dwivedi, S.K., Swarup, D., Dey, S., y Patra, R. C. (2011). Lead poisoning in cattle and buffalo near a primary lead and zinc smelter in India. *Veterinary toxicology*, 2(1), 74 - 75.
[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11308128/#:~:text=Varying%20degrees%20of%20lead%20\(Pb,violet%20movement%2C%20blindness%20and%20salivatio](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11308128/#:~:text=Varying%20degrees%20of%20lead%20(Pb,violet%20movement%2C%20blindness%20and%20salivatio)
[n](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11308128/#:~:text=Varying%20degrees%20of%20lead%20(Pb,violet%20movement%2C%20blindness%20and%20salivatio)
- García Izquierdo, C., Moreno-Ortego, J. L., Hernández Fernández, M. T., y Polo, A. 2002. Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y medio ambiente*, 125 – 138. Disponible en
<http://digital.csic.es/handle/10261/111812>
- García-Lestón, J., Méndez, J., Pásaro, E., y Laffon, B. (2012). Genotoxic effects of lead: an updated review. *International environment*, 2(4), 623 – 636.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20466424/>
- García Lozano, J. (2004). Caracterización de las respuestas fisiológicas y bioquímicas en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) sometidos a diferentes niveles de déficit hídrico. (Tesis doctoral), Universidad Nacional de Colombia. Bogotá –

Colombia. Pag 1 – 166.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52256/07797033.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gonzales Guaman, C. E. (2016). Evaluación de la concentración mínima aceptable e identificación de metales pesados presentes en el grano de cacao del Ecuador. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Machala. Machala – Ecuador. Pag, 1 – 22.
<https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/7789/1/Gonzalez.pdf>

Gonzales, M. A. (2023). Estudio verifica altas concentraciones de cadmio en cacao cultivado en el norte del Perú. Infobae.
<https://www.infobae.com/peru/2023/10/08/estudio-verifica-altas-concentraciones-de-cadmio-en-cacao-cultivado-en-el-norte-del-peru/>

Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Gunnar, S., Hattendorf, B., Gutierrez, O. y Schulin R. 2019. Acumulación y asignación de cadmio en diferentes cultivares de cacao. Ciencia del Medio Ambiente Total 15(678): 660 - 670.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>

Espinosa, J., Mite, F., Cedeño, S., Barriga, S., y Andino, J. (2006). Manejo por sitio específico del cacao basado en sistemas de información geográfica. Informaciones agronómicas. Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/24556D23CD98D2B9852579A3006D832E/\\$FILE/Manejo%20de%20sitio%20espec%C3%ADfico%20del%20Cacao....pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/24556D23CD98D2B9852579A3006D832E/$FILE/Manejo%20de%20sitio%20espec%C3%ADfico%20del%20Cacao....pdf)

Egas Yerovi, J. J. (2010). Efecto de la inoculación con Azotobacter Sp. en el crecimiento de plantas injertadas de cacao (*Theobroma cacao* L.) Genotipo Nacional, en la provincia de Esmeraldas. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Guayaquil. Quito, Ecuador. Pag, 1 – 106.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2307/1/CD-3051.pdf>

Ferrer, R. L., Herrera, R. A. 1985. Especies micorrízicas cubanas. Revista del Jardín Botánico Nacional, 6 (1), 75 - 82. <https://www.jstor.org/stable/42596616>

Ferrol, N., Tamayo, E., y Vargas, P. (2016). The paradox of heavy metals in arbuscular mycorrhizae: from mechanisms to biotechnological applications. Journal of Experimental Botany, 67 (22), 6253 – 6265. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw403>

Florida Rofner, N., Claudio Melchor, L., y Gómez Bernal, R. 2018. El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) en Leoncio

- Prado, Huánuco, Perú. Folia Amazónica 27(01): 1 - 8.
<https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.438>
- González, M., Pérez, S., y Palomino, C. (2012). Factores que inciden en la calidad sensorial del chocolate. Actualización en nutrición, Venezuela, 13(4),314 - 331.
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., et al. (2017). Absorción de cadmio por árboles de cacao en sistemas agroforestales y de monocultivo bajo manejo convencional y orgánico. La ciencia del medio ambiente total, 580, 677 - 686.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzales, V., et al. (2018). Absorption of cadmium in the soil by cocoa in Honduras. Total science environment 612, 370 - 378.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717321411>
- Hamid, Y., Tang, L., Sohail, M. I., Cao, X., Hussain, B., Aziz, M. Z., Yang, X. (2019). An explanation of soil amendments to reduce the phytoavailability of cadmium and its transfer to the food chain. Total environmental science, 660, 80 – 96.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718353154>
- He, S., He, Z., Yang, X., Stoffella, P. J., y Baligar, V. C. (2015). Chapter four: Soil biogeochemistry, plant physiology and phytoremediation of cadmium contaminated soils. Advances in agronomy, 134, 135 - 225.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211315001145>
- Hiiesalu, M. Pärtel, J. Davison, P. Gerhold, M. Metsis, M. Moora, M. Öpik, M. Vasar, M. Zobel, S. D. Wilson. (2014). Arbuscular mycorrhizal fungal species richness: associations with grassland plant richness and biomass. New phytologist, 203, 233 – 244 10. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.12765>
- Ibarra Ramos, R. E. (2022). Perspectivas para la biorremediación de suelos contaminados con plomo en Colombia. (Tesis de grado), Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá – Colombia. Pag 1 – 61.
<https://repositorio.unicolmayor.edu.co/bitstream/handle/unicolmayor/6515/Perspectivas%20para%20la%20biorremediaci%C3%B3n%20de%20Pb%20en%20suelos%20de%20colombia%20-%20Final.%20pdf-3-63.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Irigoin Quintana, V. y Trigos Tuesta, L. P. 2022. Determinación de la correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo con los contenidos de cadmio y la

- colonización micorrízica en cacao *Theobroma cacao* L. como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la región San Martín, Perú. (Tesis de pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae). Rioja – Perú. Pag, 1 – 97. https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/1631/Irigoin_Trigoso_tesis_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Iglesias, J. M. (2011). Sistemas de producción agroforestales. Capacitación y análisis en: conceptos generales y definiciones. Rev Sist Prod Agroecol, pp. 151–176.
- Jácome Molina, D. M. (2018). Efecto de la inoculación de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo-planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Colombia. Bogotá - Colombia. Pag 1 – 107. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/62938/52817213.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jiménez Tobón, C. S. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. Unilasallista, Producción + Limpia, 10 (1), 89-104. <http://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/778>
- Kabata-Pendias, A., y Pendias, H. 2001. Trace elements in soils and plants. 3rd edition. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., USA. 403p.
- Krishnamoorthy, R., Kim, C., Subramanian, P., Kim, K., Selvakumar, G., Sa, T. (2015) Arbuscular mycorrhizal fungal community structure, abundance and species richness change in soil by different concentration levels of heavy metals and metalloids. Plus one,10(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128784>
- Lázaro Cebas, J. (2016). Actividad enzimática en suelos contaminados por metales pesados y sus implicaciones como indicadores de calidad. (Tesis de pregrado), Universidad Complutense de Madrid. Madrid – España. Pag 1 – 20. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/4635b324-95ae-4c98-bea2-af9b7549637b/content>
- Leblanc, H., y Márquez, E. (2014). Efecto de los hongos formadores de micorrizas en el desarrollo de plantas de cacao en vivero. Tierra Tropical, 10(2): 191 - 200. https://www.researchgate.net/publication/328675292_EFECTO_DE_LOS_HONGOS_FORMADORES_DE_MICORRIZAS_ARBUSCULARES_EN_EL_DESARROLLO_DE_PLANTAS_DE_CACAO_EN_VIVERO/link/5bdb37714585150b2b973785/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn9

- Liu, M. et al. (2017). Nitrogen fertilizer improves growth and nutrient uptake of *Medicago sativa* inoculated with *Glomus tortuosum* grown in acidic soil contaminated with Cd, *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 167, pp. 204–211. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.145.
- Lora, R., y Bonilla, H. (2010). Remediation of a soil contaminated with the heavy metals cadmium and chromium in the upper basin of the Bogotá River. *Rev UDCA Current and Divulg Cient*, 13(2): 61 - 70. https://www.researchgate.net/publication/304253735_REMEDIATION_OF_A_SOIL_CONTAMINATED_WITH_THE_HEAVY_METALS_CADMIUM_AND_CHROMIUM_ON_THE_HIGH_BASIN_OF_THE_BOGOTA_RIVER
- López, Y. M., Cunias, M. Y., y Carrasco, Y. L. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Universidad y Sociedad*, 12(3), 344 - 352. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1594/1601>
- Luginbuehl, L. H. y Oldroyd, G. (2017). Understanding the arbuscule at the heart of endomycorrhizal symbioses in plants. *Current biology*, 27(17), 952 - 963. doi: 10.1016/j.cub.2017.06.042
- Mejía, T. (2017). Investigación Correlacional: Definición, Tipos y Ejemplos. [Lifeder.com]. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/investigacioncorrelacional/>
- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Gil-Rivero, A. E., De La Cruz-Castillo, A. J., y Villena-Zapata, L. 2021. Cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. "cacao" en la región San Martín (Lamas), Perú. *Manglar* 18 (2): 169 – 173. https://www.researchgate.net/publication/352850480_Cadmium_in_Theobroma_cacao_L_cacao_plantations_in_the_San_Martin_region_Lamas_Peru
- Meter, A., Atkinson, R. J., y Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. CAF. Recuperado de <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1505>
- Ministerio del Medio Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Supremo DS 011-2017-MINAM. Aprueban Normas de Calidad Ambiental de Suelos-EQS. Disponible en <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>

- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2004). Cultivo tecnológico de cacao. Ministerio de agricultura programa para el desarrollo de la amazonia pro amazonia. Perú. 83 p.
- Muñoz Bautista, J. D. (2017). Determinación de Cadmio en fertilizantes, plantas de *Oryza sativa* L. y suelos de la provincia del Guayas: Propuesta de saneamiento. (Tesis de pregrado), Universidad de Guayaquil. Guayaquil – Ecuador. Pag 1 – 72. <https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/cdf22b5d-3301-4559-ae4b-349c3e669b03/content>
- Nicol, G.W.; Leininger, S.; Schleper, C. y Prosser, J.I. (2008). The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of archaea and ammonia-oxidizing bacteria. *Environmental microbiology*, 10, 2966 - 2978. doi: 10.1111/j.1462-2920.2008.01701.x.
- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., y Leiva, S. 2020. Captación de cadmio en árboles de cacao nativo en tierras agrícolas de Bagua, Perú. *Agronomía* 10(10): 1551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>
- OMS. (2010). Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias comité del Codez sobre contaminantes de los alimentos. Anteproyecto de Niveles Máximos para el Cadmio en el chocolate y productos derivados 9na. Reunión. Nueva Delhi. India, pag 1 – 20.
- Pan, Y., Koopmans, G. F., Bonten, L. T. C., Song, J., Luo, Y., Temminghoff, E. J. M., y Comans, R. N. J. (2016). Temporal variability in the solubility of trace metals in a paddy soil is not reflected in the uptake by rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Geochemistry and Health*, 38 (6), 1355 - 1372. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-016-9803-7>
- Palao Flores, S. J. y Saavedra la Torre, K. A. 2020. Efectos de Hongos Micorrízicos Arbusculares para recuperación de suelos agrícolas bajo condiciones de vivero, en la EEA El Porvenir, 2020. (Tesis de pregrado), Universidad César Vallejos. Tarapoto – Perú. Pag, 1 – 88. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/63801/Palao_FSJ-Saavedra_LTKA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pérez, U., Ramírez, M., Serralde, D., Peñaranda, A., Wilches, W., Ramírez, O. y Rengifo, G. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37,121 - 130.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792019000200121&script=sci_abstract

- Phillips, J.; y Hayman, D. (1970). Improved procedures for cleaning roots and staining parasitic and vesicular - arbuscular fungi for rapid evaluation of infection. *Trans. Br. Micol. society.*, 55, 158 – 161.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007153670801103>
- Posada, R. H., Madriñan, S. y Rivera, E. L. (2012). Relationships between leaf litter colonization by saprotrophic and arbuscular mycorrhizal fungi with depth in a tropical forest. *Fungal biology*, 116(7), 747 - 755.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22749161/>
- Prieto-Benavides, Oscar Oswaldo, Belezaca-Pinargote, Carlos Eulogio, Mora-Silva, Washington Fernando, Garcés-Fiallos, Felipe Rafael, Sabando-Ávila, Freddy Agustín, y Cedeño-Loja, Pedro Emilio. (2012). Identificación de hongos micorrízicos arbusculares en Sistemas Agroforestales con cacao en el Trópico Húmedo Ecuatoriano. *Agronomía Mesoamericana*, 23(2), 233 - 239.
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v23n2/a02v23n2.pdf>
- Prieto Méndez, J. G. R. C. A.; R. G. A. D.; P. G. F. (2019). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29 – 44.
- Quiroz Vera, J. G. (2002). Caracterización molecular y morfológica de variedades superiores con características de Cacao Nacional (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador. (Tesis de maestría), Centro Agronómico Tropical de Investigación. Turrialba – Costa Rica. Pag 1 – 7.
<https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/4122/1/iniaptpQ86c.PDF>
- Reyes, Y., V. I., T. O., L. M. D., J. E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66 – 77.
https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5447
- Riopedre-Gálan, T., Delgado-Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., y Cartaya-Rubio, O. E. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4), 14.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193270002014>

- Rodríguez-Morelos VH, Soto-Estrada A, Pérez-Moreno J, Franco-Ramírez A, y Díaz-Rivera P. 2014. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the rhizosphere of seedlings and mature trees of *Swietenia macrophylla* (Magnoliophyta: Meliaceae) in Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*. 87: 9. <https://revchilhistnat.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40693-014-0009-z>
- Rojas-Mego, K.C., Elizarbe-Melgar, C., Gárate-Díaz, M.H., Ayala-Montejo, D., Pedro, Romero, C.A. (2016). Estudio del cacao en el Perú y el mundo: situación actual y perspectivas en el mercado nacional e internacional al 2015. MINAGRI-DGPA-DEEIA. Lima, Perú.
- Ruiz, X., (2014). Diversidad genética de cacao *Theobroma cacao* L., con marcadores moleculares microsatélites. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. Pag 1 – 80. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75268/7211504.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saggin-Junior, O.J., y Siqueira, J. O. 1995. Evaluation of the symbolic efficiency of endomycorrhizal fungi for coffee. *Brazilian magazine Ciênc Solo* 20: 222 – 228.
- Sarwar, N., Malhi, SS, Zia, MH, Naeem, A., Bibi, S. y Farid, G. (2010). Papel de la nutrición mineral en la minimización de la acumulación de cadmio por parte de las plantas. *Revista de ciencia de la alimentación y la agricultura*, 90 (6), 925-937.
- Sánchez, J., y Dubón, A. (2014). Informes técnicos. Recuperado de http://fhia.org.hn/downloads/informes_tecnicos/Inf_Tec_cacao_2013.pdf
- Sánchez, B. (2016). Cadmio en el suelo. 1–105.
- Sandoval-Pineda, J. F., Pérez-Moncada, U. A., Rodriguez, A., y Torres-Rojas, E. 2019. Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biológica Colombiana* 25 (3): 333 – 344. Doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>
- Sauvé, S., Hendershot, W., y Allen, H. E. (2000). Solid-Solution Partitioning of Metals in 75 Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. *Environmental Science y Technology*, 34(7), 1125 – 1131.

- Serrano, M., Martínez, N., Romero, M., Del Rio, L., y Sandallo, L. 2008. Toxicidad de cadmio en plantas. Consultado el 08 de mayo de 2018. Disponible en <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/eco-sistemas/article/view/409>.
- Schneider, J., Bundschuh, J., y Nascimento C. W. A. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation of a lead-contaminated site. *Total Science Environment*, 572, 86 - 97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716316394>
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., y Antunes, P. M. C. (2016). Bioavailability, absorption, toxicity and detoxification of cadmium in the soil-plant system. In P. de Voogt (Ed.). *Environmental pollution and toxicology reviews*, 241, 73 – 137. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27300014/>
- Shi N. N., Gao, C., Zheng, Y., y Guo, L. D. 2016. The identity and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi influence the competition of subtropical trees. *Fungal ecology* 20: 115 - 123. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1754504815001798>
- Singh, K.; Trivedi, P.; Singh, G.; Singh, B.; Patra, D. D. (2014). Effect of different leaf litter on carbon, nitrogen and microbial activities of sodic soils. *Land degradation and development*, 27(4), 1215 – 1226. https://www.researchgate.net/publication/264499826_Effect_of_Different_Leaf_Litters_on_Carbon_Nitrogen_and_Microbial_Activities_of_Sodic_Soils
- Singh, B. R., y McLaughlin, M. J. (1999). Cadmio en suelos y plantas. *Desarrollos en Ciencias de Plantas y Suelos*, 85. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-94-011-4473-5_1
- Siqueira J. 1989. Occurrence of arbuscular vesicular mycorrhizae in natural agroecosystems of the State of Minas Gerais. *Agricultural Research*. Brás, Brasilia, 24 (12): 1496 - 1506.
- Smith, S. y Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis: Symbionts form arbuscular mycorrhizae*. Britain. 3ra edic Elsevier.
- Tadeo, F. y Gómez, A. (2008). Fisiología de las plantas y el estrés. En: azcón-bieto, J. y M. Talón. *Fundamentos de fisiología*.
- Tantalean Pedraza, E., y Huauya Rojas, M. A. 2017. Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos de cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de investigación*

agroproduccion sustentable 1(2): 69 – 78
<https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/view/365/415>

- Tedersoo, M. Bahram, T. Cajthaml, S. Põlme, I. Hiiesalu, S. Anslan, H. Harend, F. Buegger, K. Pritsch, J. Koricheva, y K. Abarenkov. (2016). The effects of tree diversity and species identity on fungi, protists, and soil animals depend on context. ISME J. 10, 346 – 362.10.1038/ismej.2015.116
- Tedersoo, L., Bahram, M., y Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. Science, 367(6480). doi:10.1126/ science. aba1223.
- Trujillo, A. T., M. L. V. C., S. E. M. J. (2020). Metales en suelos productores de arroz. Suelos Ecuatoriales, 50 (1y2), 1 – 2.
- Unión Europea (UE). (2014). Regulation No. 488/2014. They modify EC Regulation No 1881/2006 regarding the maximum content of cadmium in food products. Inf. téc. Official Journal of the European Union. Online: <https://bit.ly/3uvfOxT>
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N., y Marín, C. 2022. Una alta diversidad de hongo micorrizicos arbusculares influye en la absorción de cadmio y crecimiento vegetativo del cacao. Biogra 34 (1). Pag, 75-84. <http://www.doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- Velásquez, A. 2024. Investigación no experimental: Qué es, características, ventajas y ejemplos. QuestionPro. <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-no-experimental/#que-es-la-investigacion-no-experimental>
- Venturo Minauro Genovith Korin. (2017). Determinación del contenido de cadmio en almendras frescas de tres variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) y del suelo y su relación con el pH y la conductividad eléctrica en las zonas de Juanjuí y Pucacaca (Tesis de Pregrado), Universidad Nacional de San Martín. <http://hdl.handle.net/11458/3621>
- Viera Santana K. G. (2011). Los niveles de exportación de cacao en el Ecuador por variedades. (Tesis de pregrado), Universidad de Guayaquil. Guayaquil – Ecuador. Pag 1 – 99. <https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c318ceec-9a00-4b78-9a7c-7deb20a03a2a/content>
- Wang, F., (2017). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in sites impacted by mining and their contribution to ecological restoration: mechanisms and applications.

Critical. Rev. Environment. Science. technology. 47, 1901–1957.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2017.1400853>

- Wong Rivera, A. F. (2017). Determinación de cadmio (cd) en suelo de cultivo para cacao CCN-51 mediante análisis de espectroscopia de absorción atómica. (Tesis de pregrado), Universidad de Guayaquil. Guayaquil – Ecuador. Pag 1 – 64.
<https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7cc697e3-2045-4abd-be82-98004317c90e/content>
- Yadav, S. K. (2010). Heavy metal toxicity in plants: an overview of the role of glutathione and phytochelatins in plant tolerance to heavy metal stress. South African Journal of Botany, 76(2), 167 - 179.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629909003159>
- Zarei M, König S, Hempel S, Nekouei MK, Savaghebi G, Buscot F (2018). Estructura comunitaria de hongos micorrízicos arbusculares asociados a *Veronica rechingeri* en la región minera de zinc y plomo de Anguran. Contaminación ambiental, 156(3), 1277–1283.
- Zhang D, Mischke S, Johnson ES, Phillips-Mora W, Meinhardt L. (2009). Molecular characterization of an international cocoa collection using microsatellite markers. Genetics and genomes of trees, 5(1), 1 – 10.

ANEXOS

Anexo 01: Composición de las zonas de muestreo de cada tratamiento

Tratamiento	Localidad	Descripción de tratamiento	Área total	N° árboles	Composición secundaria	Nombre científico
T1	Cedro Pampa	CACAO + GUABA	1 250 m ²	6	Guaba	<i>Inga edulis</i>
T2	San Antonio (Celendin)	CACAO + ESPECIES FORESTALES	1 250 m ²	2	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i>
				2	Pinochuncho	<i>Schizolobium amazonicum</i>
				3	Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i> G. King
				1	Paliperro	<i>Miconia barbeyana</i> Cogniaux
T3	San Antonio (Celendin)	CACAO + POLICULTVO	1 250 m ²	4	Guaba	<i>Inga edulis</i>
				1	Zapote	<i>Pouteria sapota</i>
				2	Mandarina	<i>Citrus reticulata</i>
T4	Tabalosos (Sector Maroma)	CACAO	1 250 m ²	137	-	-

Anexo 02: Porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales

Tratamientos	Descripción	Colonización micorrízica (%)
T1	CACAO + GUABA	92
		75
		80
T2	CACAO + ESPECIES FORESTALES	100
		92
		95
T3	CACAO + POLICULTVO	100
		92
		95
T4	CACAO	90
		95
		97

Anexo 03: Prueba de normalidad y prueba de Kruskal Wallis de la variable porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao

Normalidad

```
Shapiro-wilk normality test  
data:  Colonización  
W = 0.84443, p-value = 0.03135
```

Prueba de Kruskal Wallis

```
Kruskal-wallis rank sum test  
  
data:  Colonizacion by Parcelas  
  
Kruskal-wallis chi-squared = 4.8845, df = 3, p-value = 0.1805  
sig.: n.s
```

Anexo 04: Concentración de cadmio en el suelo, raíces, hojas y granos de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales

Anexo 05: Prueba de normalidad y análisis de varianza de la variable concentración de cadmio en el suelo de parcelas productivas de cacao

Tratamientos	Descripción	Cadmio en raíz (ppm)	Cadmio en granos (ppm)	Cadmio en hojas (ppm)	Cadmio en suelo (ppm)
T1	CACAO + GUABA	3,42	0,64	6,30	0,70
		2,24	1,08	3,02	0,78
		1,79	0,51	4,42	0,78
T2	CACAO + ESPECIES FORESTALES	1,38	0,36	3,10	0,84
		0,77	0,53	3,07	0,81
		0,77	0,40	2,09	0,72
T3	CACAO + POLICULTVO	0,92	0,70	1,59	0,55
		1,50	0,84	1,19	0,64
		1,15	0,75	2,67	0,64
T4	CACAO	0,92	1,05	1,36	0,67
		1,15	0,12	1,33	0,72
		0,88	0,18	2,02	0,81

asociadas a diferentes sistemas forestales

Normalidad

Shapiro-wilk normality test
data: Cadmio.Suelo
w = 0.95207, p-value = 0.6674

Análisis de Varianza

```
aov(formula = Cadmio.Suelo ~ Tratamiento)

          Df Sum Sq Mean Sq  F-value Pr(>F)
Tratamiento  3 0.05483 0.018278   5.311  0.0263 *
Residuals    8 0.02753 0.003442
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Anexo 06: Prueba de normalidad y prueba de Kruskal Wallis de la variable concentración de cadmio en raíces de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales

Normalidad

```
Shapiro-wilk normality test

data:  Cadmio.Raíz
W = 0.79321, p-value = 0.00785
```

Prueba de Kruskal Wallis

```
Kruskal-wallis rank sum test

data:  Cadmio.Raíz by Tratamiento
Kruskal-wallis chi-squared = 7.3852, df = 3, p-value = 0.06058
sig.: n.s
```

Anexo 07: Prueba de normalidad y análisis de varianza de la variable concentración de cadmio en hojas de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales

Normalidad

```
Shapiro-wilk normality test
data:  Cadmio.Hojas
W = 0.86141, p-value = 0.05092
```

Análisis de Varianza

```
aov(formula = Cadmio. Hojas ~ Tratamiento)

              Df Sum Sq Mean Sq  F value    Pr(>F)
Tratamiento    3 16.778   5.593    5.923 0.0198 *
Residuals      8  7.555   0.944
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Anexo 08: Prueba de normalidad y análisis de varianza de la variable concentración de cadmio en granos de cacao asociadas a diferentes sistemas forestales

Normalidad

```
Shapiro-Wilk normality test
data:  Cadmio.Granos
W = 0.96743, p-value = 0.8821
```

Análisis de Varianza

```
aov(formula = Cadmio.Granos ~ Tratamiento)

              Df Sum Sq Mean Sq  F value    Pr(>F)
Tratamiento    3  0.2957  0.09858    1.057    0.419
Residuals      8  0.7461  0.09327

signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Anexo 09: Resultados de los análisis de caracterización de suelo



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 : AS121-01-2022
SOLICITANTE : STEFANY SOLÍS SALIS
PROCEDENCIA : SAN MARTÍN - LAMAS - CEDRO PAMPA - CELENDIN
CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 08/12/2021
FECHA DE RECEP. LAB : 25/07/2022
FECHA DE REPORTE : 01/08/2022

Item	Número de la muestra				pH	C.E.	CaCO ₃	M.O.	N	P	K	CIC	CICef	Ca	Mg	K	Na	Al ³⁺	Suma de Bases	Saturación de Bases	Saturación de Al ³⁺	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			CLASE TEXTURAL
						ds/cm	%	%	%	ppm	ppm	cmolc/kg						cmolc/kg	%	%	ARENA %	LIJO %	ARCILLA %		
	Lab.			Campo																					
01	22	07	0690	P1-1 CCN51- SAF-ORGA.	5.93	0.33	<0,3	3.76	0.19	5.52	160	33.72	27.72	24.26	2.84	0.41	0.21	0.00	27.72	82.20	0.00	28.24	30.00	41.76	Arc
02	22	07	0691	P1-2 CCN51- SAF-ORGA.	5.82	0.35	<0,3	4.73	0.24	5.22	165	31.93	27.53	24.04	2.80	0.42	0.26	0.00	27.53	86.22	0.00	28.24	33.00	38.76	Fra-Arc

MÉTODOS	
TEXTURA	PIEOMÉTRICO
pH	POTENCIOMÉTRICO SUSPENSIÓN SUELO:AGUA RELACION 1:2.5
CONDUCT. ELÉCTRICA	CONDUCTIMÉTRICO SUSPENSIÓN SUELO:AGUA 1:2.5
CARBONATOS	GAS - VOLUMÉTRICO
FOSFORO DISPONIBLE	OLUSIN MODIFICADO EXTRACTO NH ₄ CO ₃ -H ₂ SO ₄ pH 4.5 10 ml
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIALES	ANÁLISIS POR FLUÍDO IÓNICO (FID) 10 ml
MATERIA ORGÁNICA	WALKLEY y BLACK
CLORO Y MAGNESIO INTERCAMBIALES	EXTRACTO KNO ₃ EN ÁCIDO CLORHIDRICO pH 7.0 Acelerado térmico
ACIDEZ INTERIORE	EXTRACTO KNO ₃ 1% VOLUMETRIA
ACIDEZ POTENCIAL	WOMANLY MODIFICADO
CIC y CICef	ACIDEZ POTENCIAL + SUMA DE BASES
Ca, Mg, K y Na	OTRA: método de extracción de 7.5 Acelerado térmico
MOG	Inductivo / Espectrometría UV-Vis (402 nm) con Agente de extracción
ANÁLISIS	Inductivo / Espectrometría UV-Vis (402 nm)
ANÁLISIS DE PLANTAS	OTRA: método

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

La Banda de Shilcayo, 01 de Agosto del 2022

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERU

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



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 : AS121-02-2022
SOLICITANTE : STEFANY SOLSOL SALIS
PROCEDENCIA : SAN MARTIN LAMAS-SECTOR CEDRO PAMPA - SAN ANTONIO
CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 10/12/2021
FECHA DE RECEPCIÓN LAB : 25/07/2022
FECHA DE REPORTE : 01/08/2022

Núm.	Número de la muestra				pH	C.E	CaCO ₃	M.O.	N	P	K	ClC	ClCel	Cu	Mg	K	Na	Al ³⁺	Suma de Bases	Saturación de Bases	Saturación de Al ³⁺	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			CLASE TEXTURAL
	Lab	Campo				ds/cm	%	%	%	ppm	ppm				cmol/kg				cmol/kg	%	%	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	
01	22	07	0692	P2- 1ICS95- SAF-ORGA.	6.30	0.36	<0.3	4.83	0.24	3.27	53	24.18	23.18	21.55	1.34	0.14	0.15	0.00	23.18	95.86	0.00	22.24	36.00	41.76	Arc
02	22	07	0693	P2- 2ICS95- SAF-ORGA.	6.33	0.46	<0.3	5.11	0.26	4.95	60	23.14	22.54	21.03	1.22	0.15	0.14	0.00	22.54	97.41	0.00	19.24	39.00	41.76	Arc
03	22	07	0694	P3- 1CCN51- SAF-CONVE.	6.74	0.33	7.92	2.68	0.13	3.88	27	13.14	13.14	11.76	1.23	0.07	0.09	0.00	13.14	100.00	0.00	40.24	27.00	32.76	Fra-Arc
04	22	07	0695	P3- 2CCN51- SAF-CONVE.	5.37	0.26	<0.3	1.33	0.07	1.73	71	20.43	17.73	14.67	2.64	0.18	0.14	0.10	17.63	86.29	0.56	19.24	30.00	50.76	Arc

MÉTODOS:	
TEXTURA	HERMÉTICO
pH	POTENCIOMETRICO SUSPENSIÓN SUELO-AGUA 1:2.5
CONDUCT. ELÉCTRICA	CONDUCTIMETRICO SUSPENSIÓN SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	GAS - VOLUMETRICO
FUSORIO SUPLENIBLE	CLUBIN MODIFICADO EXTRACT NaHCO ₃ 0.05M, pH 3.5 Esp. Vis
INTABO Y SODIO INTERCAMBIABLE	NaHCO ₃ 0.05M pH 3.5 Esp. Vis
MATERIA ORGÁNICA	WALKLEY / BLACK
SODIO Y AMONIO INTERCAMBIABLE	EXTRACT KOH 1N 6 NaHCO ₃ 0.05M pH 3.5 Esp. Vis
ACIDEZ INTORC	EXTRACT KOH 1N VOLUMETRICO
ACIDEZ POTENCIAL	WOODRUFF MODIFICADO
CO pH 1:6	ACIDEZ POTENCIAL + SUELO DE BASES
Fe, Cu, Zn y Mn	OTPMETRIA 0.05M, pH 1.3 Absorbencia Atómica
Molib	Espectrometría de absorción atómica (AAS) con hidruro de hidruro
AZUFRE	Estación / Turbidimetría (N-42) con
METAL PESADOS	EPA 3005

La Banda de Shilcayo, 01 de Agosto del 2022

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERU

Cesar O. Arzola Hernandez, 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 AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 90072183

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

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS - CARACTERIZACIÓN

N° SOLICITUD : AS121-03-2022
SOLICITANTE : STEFANY SOLSOL SALIS
PROCEDENCIA : SAN MARTÍN - LAMAS - TABALOSOS - MARONA
CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 15/12/2021
FECHA DE RECEP. LAB : 25/07/2022
FECHA DE REPORTE : 01/08/2022

Item	Número de la muestra				pH	D.E.	CaCO3	M.D.	N	P	K	OC	ClCel	Ca	Mg	K	Na	Al3+	Suma de Bases	Saturación de Bases	Saturación de Al3+	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			CLASE TEXTURAL
	Lab.	Campo	ds/cm	%		%	ppm	ppm	cmol/kg			cmol/kg			%	%	ARENA %	LIJO %	ARCILLA %						
01	22	07	0696	P4- 1ICS65- SAF-CONVE.	7.04	0.57	5.76	7.56	0.38	7.71	148	29.80	29.80	27.11	2.15	0.38	0.17	0.00	29.80	100.00	0.00	31.24	27.00	41.75	Arc
02	22	07	0697	P4- 2 ICS65- SAF-CONVE.	7.20	0.48	4.32	5.91	0.30	4.87	199	27.08	27.08	24.22	2.12	0.51	0.22	0.00	27.08	100.00	0.00	31.24	27.00	41.75	Arc

MÉTODOS :	HOROMETRO
TEXTURA :	POTENCIOMETRO SUSPENSION SUELO AGUA RELACION 1:2.5
pH :	CONDUCTIVIDAD SUSPENSION SUELO AGUA 1:2.5
CONDUCT. ELÉCTRICA :	CAS- VOLUMETRICO
CARBONATOS :	CLORURO AMONÍACO EXTRACT. NITRÓGENO, -CLORURO, pH 1.8. Dap. 10%
FOSFORO DISPONIBLE :	(NH ₄) ₂ SO ₄ COOH-H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
MATERIA ORGÁNICA :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
CLORO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
ACIDEZ INTERNO :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
ACIDEZ POTENCIAL :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
CC (pH 7.0) :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
FLUORURO (ppm) :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
SODIO :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
AZUFRE :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)
METALES PESADOS :	EXTRACT. RO-4 IN 8 (NH ₄ OH 5-0.003H ₂ N, pH 7. Alabaster Admora)

La Banda de Shilcayo, 01 de Agosto del 2022

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERU

Cesar O. Arzola Hernandez, 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
ANÁLISIS DE SUELOS

TABLA DE INTERPRETACION DE ANALISIS DE SUELOS

SALINIDAD		Materia Orgánica Fósforo disponible Potasio disponible					
Clasificación	C.E (mS/cm)	Clasificación	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg Ca/Mg
* No salino	< 2	* Bajo	< 2	< 7.0	< 100	* Normal	0.2 - 0.3 5 - 9
* Ligeramente salino	2 - 4	* Medio	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	* Def. Mg	> 0.5
* Medianamente salino	4 - 8	* Alto	> 4	> 14.0	> 240	* Def. K	> 0.2
* Fuertemente salino	8 - 16					* Def. Mg	> 10
* Extremadamente salino	> 16						

Equiv. : 1 mS/cm = 1 dS/m = 1 mmhos/cm

Reacción o pH		CLASES TEXTURALES				Distribución de Cationes %	
Clasificación	pH						
* Fuertemente ácido	< 5.5	Are = Arena	Fra - Arc- Are = Franco Arcillo Arenoso			Ca ²⁺	= 60 - 75
* Moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Are - Fra = Arena Franca	Fra - Arc = Franco Arcilloso			Mg ²⁺	= 15 - 20
* Ligeramente ácido	6.1 - 6.99	Fra - Are = Franco Arenoso	Fra - Arc - Lim = Franco Arcillo Limoso			K ⁺	= 3 - 7
* Neutro	7.0	Fra = Franco	Arc - Are = Arcillo Arenoso			Na ⁺	= < 15
* Ligeramente alcalino	7.01 - 7.8	Fra - Lim = Franco Limoso	Arc - Lim = Arcillo Limoso				
* Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4	Lim = Limoso	Arc = Arcilloso				
* Fuertemente alcalino	> 8.5						

REVISION-19-09

por Stefany Solsol Salis

Fecha de entrega: 19-sep-2024 09:11a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2457943921

Nombre del archivo: AGRONOMIA-Stefany_Solsol_Salis_18_09_2024.docx (9.09M)

Total de palabras: 17404

Total de caracteres: 99342

REVISION-19-09

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

tesis.unsm.edu.pe

Fuente de Internet

5%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

4%

3

repositorio.ucss.edu.pe

Fuente de Internet

3%

4

repositorio.unsm.edu.pe

Fuente de Internet

2%

5

Submitted to Universidad Nacional de San
Martín

Trabajo del estudiante

1%

6

repositorio.unp.edu.pe

Fuente de Internet

1%

7

repositorio.unal.edu.co

Fuente de Internet

1%

8

repositorio.unheval.edu.pe

Fuente de Internet

1%

9

dspace.unl.edu.ec

Fuente de Internet