

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



**EFFECTO DE DOS FUENTES Y NIVELES DE MATERIA ORGÁNICA EN LA
DISMINUCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES DE *Theobroma cacao*
(CACAO) EN VIVERO - TINGO MARÍA**

Tesis

**Para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO**

**Presentado por:
ALBERTO MUÑOZ ESPINOZA**

**Asesor
JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO**

**Tingo María – Perú
2023**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE AGRONOMÍA



Km 1.21 carretera Tingo María. Telf. (062) 561136 E.mail: fagro@unas.edu.pe.

"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Nº 031-2023-FA-UNAS

BACHILLER : ALBERTO MUÑOZ ESPINOZA

TÍTULO : "EFECTO DE DOS FUENTES Y NIVELES DE MATERIA ORGÁNICA EN LA DISMINUCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES DE *Theobroma cacao* (CACAO) EN VIVERO - TINGO MARÍA"

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : M.Sc. JORGE LUIS ADRIAZOLA DEL AGUILA
VOCAL : M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL : M.Sc. LLERME NAVARRO VASQUEZ

ASESOR : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 20/12/2023

HORA DE SUSTENTACIÓN : 09:00 A.M.

LUGAR DE SUSTENTACIÓN : SALA AUDIVISUAL DE LA F.A

CALIFICATIVO : MUY BUENO

RESULTADO : APROBADO

OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 20 DE DICIEMBRE DE 2023

.....
M.Sc. JORGE LUIS ADRIAZOLA DEL AGUILA
PRESIDENTE

.....
M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL

.....
M.Sc. LLERME NAVARRO VASQUEZ
VOCAL

.....
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
ASESOR



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 067 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Agronomía

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTO DE DOS FUENTES Y NIVELES DE MATERIA ORGÁNICA EN LA DISMINUCIÓN DE CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES DE Theobroma cacao (CACAO) EN VIVERO - TINGO MARÍA	ALBERTO MUÑOZ ESPINOZA	23 % Veintitrés

Tingo María, 26 de febrero de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



Título : Efecto de dos fuentes y niveles de materia orgánica en la disminución de cadmio en el suelo y plantones de *Theobroma cacao* (Cacao) en vivero - Tingo María

Autor : Alberto Muñoz Espinoza

Asesor : Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano

Programa de investigación : Suelos y fertilizantes

Línea (s) de investigación : Fertilidad, manejo y clasificación de suelos

Eje temático : Descontaminación de cadmio en suelo y plantones de cacao

Lugar de Ejecución : Vivero “El Agrónomo” – Facultad de Agronomía - UNAS

Duración del trabajo : 7 meses

Tingo María – Perú. Enero, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DE TÍTULO

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Agronomía
Título de Tesis	: Efecto de dos fuentes y niveles de materia orgánica en la disminución de cadmio en el suelo y plantones de <i>Theobroma cacao</i> (Cacao) en vivero - Tingo María
Autor	: Alberto Muñoz Espinoza
DNI	: 45979537
Correo electrónico	: Alberto.muñoz@unas.edu.pe
Asesor	: Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano
Escuela Profesional	: Agronomía
Programa de investigación	: Suelos y fertilizantes
Línea (s) de investigación	: Fertilidad, manejo y clasificación de suelos
Eje temático de investigación	: Descontaminación de cadmio en suelo y plantones de cacao
Lugar de Ejecución	: Vivero “El Agrónomo” – Facultad de Agronomía - UNAS
Duración del trabajo	: 7 meses
Fecha de Inicio	: Setiembre del 2017
Término	: Marzo del 2018
Financiamiento	: S/ 7 786,00
FEDU	: NO
Propio	: SI
Otros	: NO

Tingo María – Perú. Enero, 2023

DEDICATORIA

A Dios, celestial por estar siempre en mi camino, que me permitió realizarme profesionalmente y su presencia me acompaña a donde vaya.

A mis queridos padres, mi esposa mis hijas, que con su esfuerzo y ejemplo me apoyaron en toda mi formación académica por impulsarme el deseo constante de verme realizado como profesional.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todo el personal que la conforman, por su apoyo y confianza, en especial a los docentes de la Facultad de Agronomía que contribuyeron en mi formación profesional.

- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, asesor de la presente tesis, por su apoyo en la elaboración, ejecución, culminación y revisión de la investigación académica y científica.

- A los miembros del jurado de tesis M. Sc. Jorge Luis Adriazola Del Águila, M. Sc. Llerme Navarro Vásquez y M. Sc. Jaime Josseph Chávez Matías, por su valiosa colaboración en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

- A mis queridos padres por su apoyo moral y económico que hicieron durante todo el desarrollo del trabajo de investigación.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
ABSTRACT	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Generalidades	3
2.1.1. Cultivo de cacao.....	3
2.1.2. Importancia social, ambiental y económica del cacao.....	3
2.1.3. Rendimiento del cacao en el Perú.....	4
2.2. Metales pesados en suelos agrícolas.....	5
2.2.1. Identificación de algunos metales pesados	5
2.2.2. Contaminación del suelo.....	6
2.2.3. Movilidad de metales pesados en el suelo	7
2.2.4. Cadmio.....	7
2.2.5. Origen del cadmio.....	10
2.2.6. Fuentes de exposición al cadmio	10
2.2.7. Cadmio en las plantas	11
2.3. Materia orgánica del suelo.....	12
2.3.1. Origen y composición de la materia orgánica del suelo	12
2.3.2. Importancia de la materia orgánica del suelo	13
2.3.3. Efectos benéficos de la materia orgánica del suelo	13
2.3.4. Formas de materia orgánica del suelo.....	14
2.3.5. Mineralización de nutrientes de la materia orgánica del suelo.....	14
2.3.6. Asociación de la materia orgánica del suelo con los metales pesados ..	15
2.3.7. Asociación de cadmio con materia orgánica del suelo	16
2.4. Antecedentes.....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Lugar de ejecución.....	18
3.2. Materiales y métodos.....	18
3.2.1. Material y equipos	18
3.2.2. Metodología.....	18
3.2.2.1. Análisis físico químico del suelo inicial.....	18
3.2.2.2. Análisis químico del estiércol de vacuno y gallinaza.....	20

3.2.2.3. Análisis físicos químicos final del suelo (Sustrato).....	20
3.2.2.4. Componentes en estudio	22
3.2.2.5. Tratamientos en estudio.....	22
3.2.2.6. Diseño Experimental	22
3.2.2.7. Análisis de varianza.....	23
3.2.2.8. Características del campo experimental	23
3.2.3. Ejecución del experimento.....	24
3.2.3.1. Selección del suelo	24
3.2.3.2. Selección del material orgánico.....	24
3.2.3.3. Cálculo e incubación de cadmio.....	24
3.2.3.4. Mezcla de material orgánico y llenado de bolsas	25
3.2.3.5. Obtención y pre germinado de la semilla	26
3.2.3.6. Siembra de las semillas.....	26
3.2.3.7. Riego de los plántones de cacao	26
3.2.4. Características evaluadas	26
3.2.4.1. Altura y diámetro de tallo de plántones	26
3.2.4.2. Peso fresco y seco de plántones.....	26
3.2.4.3. Cadmio en suelo	26
3.2.4.4. Cambio en plántones de cacao.....	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1. Parámetros biométricos de plántones de cacao en vivero	28
4.1.1. Altura y diámetro de tallo de plántones de cacao	28
4.1.2. Peso fresco y seco de los plántones de cacao	31
4.2. Cadmio en el suelo y plántones de cacao	33
4.2.1. Cadmio disponible, asociado a materia orgánica y total.....	33
4.2.2. Cadmio en plántones de cacao.....	37
4.3. Correlación de Pearson entre cadmio en plántones de cacao con cadmio asociado a materia orgánica, disponible y total	40
V. CONCLUSIONES	43
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	44
VII. REFERENCIAS.....	45
ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Análisis físico químico del suelo inicial	19
2. Análisis químico de estiércol de vacuno y gallinaza.....	20
3. Análisis físico químico de los sustratos al final del experimento.....	21
4. Descripción de tratamientos en estudio	22
5. Esquema del análisis de varianza para un diseño completo al azar	23
6. Cálculo de la cantidad de sulfato de cadmio que se pesará para preparar una concentración de 1000 ppm de cadmio.....	24
7. Cálculo de la solución de cadmio para adicionar al suelo	25
8. Cálculo del contenido de materia orgánica.....	25
9. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para la altura y diámetro de plantones de cacao.....	28
10. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para la altura y diámetro de plantones de cacao.	29
11. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para la peso fresco y seco de plantones de cacao.....	31
12. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para peso fresco y seco de plantones de cacao a los 120 días después de la siembra en vivero	32
13. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para cadmio disponible, asociado a materia orgánica y total.	34
14. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para cadmio disponible, asociado a materia orgánica y total en suelos.	35
15. Análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para cadmio en plantones de cacao	38
16. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para cadmio en plantones de cacao	38
17. Análisis de correlación de Pearson entre cadmio total en plantones de cacao con análisis de suelos.	40
18. Evaluaciones de altura y diámetro de plantones de cacao	53
19. Evaluación de peso fresco y seco de plantones de cacao.....	54
20. Análisis físico químico a sustratos	54
21. Análisis químico de contenido de cadmio	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Ubicación del campo experimental.....	18
2.	Desarrollo de plántones de cacao por efecto de dos enmiendas y tres dosis: a altura (cm); b diámetro (mm).....	30
3.	Peso de plántones de cacao por efecto de dos enmiendas y tres dosis: a peso fresco; b peso seco	33
4.	Contenido de cadmio en suelo por efecto de dos enmiendas y tres dosis: a cadmio disponible; b cadmio asociado a materia orgánica; c cadmio total.....	36
5.	Curva de regresión polinómica entre el porcentaje de materia orgánica con cadmio en plántones de cacao.....	39
6.	Cadmio en plántones de cacao por efecto de dos enmiendas y tres dosis.....	39
7.	Diagrama de dispersión entre cadmio en plántones de cacao con cadmio asociado a materia orgánica	41
8.	Llenado de bolsas y ordenado por tratamientos	55
9.	Selección de semillas con mejor radícula	56
10.	Desarrollo de plántones de cacao	56
11.	Incorporación de agua a plántones de cacao	57
12.	Evaluaciones de altura y diámetro	57

RESUMEN

Este estudio se llevó a cabo en las instalaciones del vivero de la Facultad de Agronomía, situado en la ciudad de Tingo María, en el distrito de Rupa Rupa, dentro de la provincia de Leoncio Prado, en la región de Huánuco. En este contexto, se emplearon tierras de cultivo, se seleccionaron cuidadosamente semillas de cacao de la variedad CCN-51 y se aplicaron tres diferentes cantidades de estiércol de vacuno y gallinaza. El experimento se llevó a cabo con un total de ocho tratamientos distintos, identificados como sigue: T₀ (control absoluto), T₁ (control con 10 ppm de cadmio (Cd)), T₂ (34 g de estiércol de vacío + 10 ppm de Cd), T₃ (68 g de estiércol de vacío + 10 ppm de Cd), T₄ (102 g de estiércol de vacío + 10 ppm de Cd), T₅ (32 g de gallinaza + 10 ppm de Cd), T₆ (64 g de gallinaza + 10 ppm de Cd) y T₇ (96 g de gallinaza + 10 ppm de Cd). Estos tratamientos se distribuyeron de manera aleatoria en un diseño completamente al azar, con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Se concluye que la aplicación de enmiendas orgánicas, como el estiércol de vacuno y la gallinaza, aumenta la disponibilidad de Cd en el suelo. Sin embargo, a medida que se aumenta la cantidad de estas enmiendas orgánicas, se incrementa la asociación del Cd con la materia orgánica (MO). Como resultado, se observará una reducción en el contenido de Cd en los plántones de cacao en los tratamientos T₇ y T₄. En cuanto a la influencia de las enmiendas orgánicas en el crecimiento de los plántones de cacao, se encontraron efectos negativos. A medida que se aumentaban las dosis de enmiendas orgánicas, se controlaría una disminución en la altura, el diámetro del tallo y el peso fresco y seco de los plántones. También se observarán problemas como el secado de los bordes de las hojas e incluso la caída de algunas plantas. Las enmiendas orgánicas incrementaron el contenido de Cd disponible en el suelo, pero a mayores dosis de enmiendas orgánicas, se produjo una mayor asociación del Cd con la MO. En lo que respecta al contenido de Cd en los plántones de cacao, se encontró un efecto positivo en los tratamientos con 96 g de gallinaza y 102 g de estiércol de vacuno, lo que resultó en niveles más bajos de Cd. Además, se observó una medición significativa entre el Cd asociado a la MO, pero no hubo una medición significativa con el Cd disponible y el Cd total.

Palabras claves: Cadmio disponible, cadmio asociado a materia orgánica, cadmio total, estiércol de vacuno, gallinaza

ABSTRACT

The present research work was carried out in the nursery of the Faculty of Agronomy located in the city of Tingo María, district of Rupa, province of Leoncio Prado, region of Huánuco, agricultural land, duly selected CCN-51 clone cocoa seeds and three doses of cattle manure and chicken manure were used. The treatments were eight, T₀ (absolute control), T₁ (Control with 10 ppm of Cd), T₂ (34 g of bovine manure + 10 ppm of Cd), T₃ (68 g of bovine manure + 10 ppm of Cd), T₄ (102 g of are conformed + 10 ppm of Cd), T₅ (32 g of chicken manure + 10 ppm of Cd), T₆ (64 g of chicken manure + 10 ppm Cd) and T₇ (96 g of chicken manure + 10 ppm Cd), randomly distributed in the DCA model ($\alpha = 0,05$). It was concluded that the application of organic amendments to chicken manure increased the availability of Cd in the soil, however, the higher the dose of these organic amendments, the greater the Cd associated with organic matter (OM), reasons for which lower cadmium content was determined in cocoa seedlings with the T₇ and T₄ treatments. The influence of organic amendments on the growth of cocoa seedlings was negative, due to the fact that, at higher doses, lower height, lower stem diameter, fresh and dry weight were obtained, presenting drying problems on the edge of the leaves and in some plants until the fall. The organic amendments increase the Cd content available in the soil, however, the higher the dose of organic amendments, the higher the Cd associated with OM; Regarding the Cd content in cocoa seedlings, a positive effect was determined, I must that in the doses of 96 g of chicken manure and 102 g of bovine manure, lower Cd was verified, in addition the correlation was significant in Cd associated with OM and not significant in available Cd and total Cd.

Keywords: Available cadmium, cadmium associated with organic matter, cattle manure, chicken manure, total cadmium.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha surgido una creciente inquietud a nivel global debido a la presencia de Cd en los suelos utilizados para cultivar cacao, así como al riesgo de que este elemento entre en la cadena alimentaria. Esto se debe a los efectos tóxicos que el Cd puede tener en seres humanos y animales (Bonomelli et al., 2003). Una vez ingerido, el Cd tiene la capacidad de acumularse en el riñón y el hígado, pudiendo ocasionar alteraciones en el sistema óseo, esta acumulación de Cd en el cuerpo puede dar lugar a una enfermedad conocida como Itai-Itai, que fue identificada inicialmente en Japón (Gupta y Gupta, 1998; como se citó en Bonomelli et al., 2003). El comportamiento del Cd presente en el suelo depende en gran medida de la naturaleza de las reacciones químicas y de los diversos procesos físicos y biológicos que tienen lugar en dicho suelo. Las reacciones clave que intervienen en las interacciones entre los metales y los componentes del suelo incluyen la adsorción, la precipitación y la formación de complejos (Ahumada y Schalscha, 1995, Helmke, 1999; como se citó en Bonomelli et al., 2003). En la actualidad, una de las principales preocupaciones en el ámbito agroeconómico es la presencia de Cd de origen natural, este Cd proviene de procesos de meteorización, erupciones volcánicas, incendios y el transporte aéreo de partículas. Asimismo, López (2011) manifiesta que Las actividades humanas, como la minería, la fundición, la agricultura y la eliminación de residuos industriales, son los principales responsables de la acumulación no deseada de Cd en cantidades significativas.

La presencia de metales pesados en los cultivos de cacao se ha convertido en un desafío creciente para los agricultores en la provincia de Leoncio Prado, en Huánuco, así como en todo el país. Esto se debe a que el cacao contiene cantidades significativas de Cd en sus almendras, superando los límites establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), que estableció que los alimentos no deben contener más de 0,5 partes por millón (ppm) de metales pesados. Esta situación podría afectar la comercialización del cacao en los mercados internacionales, lo que tendría un impacto negativo en la economía de la región. Por estas razones lo principal de este estudio de investigación es analizar cómo la presencia de materia orgánica en el suelo (MOS) influye en la reducción de la disponibilidad de Cd para las plantas de cacao.

Objetivo general

Determinar el efecto de estiércol de vacuno y gallinaza en la disminución de cadmio en suelo y plantones de cacao en vivero.

Objetivos específicos

1. Determinar la influencia de niveles del estiércol de vacuno y gallinaza en los plántones de cacao en vivero.
2. Determinar el efecto de niveles del estiércol de vacuno y gallinaza en la disminución de cadmio en el suelo y plántones de cacao
3. Determinar la correlación de Pearson entre el contenido de cadmio en plántones de cacao con cadmio en suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades

2.1.1. Cultivo de cacao

El cacao es un cultivo tropical que se encuentra ampliamente distribuido en África, Asia, Oceanía y América. Se cultiva principalmente para obtener sus granos o almendras, que son utilizados como materia prima en la producción de chocolate, pertenece al género *Theobroma* y está clasificado en la familia de las *Malvaceae*, que incluye más de 22 especies en total (Organización Internacional del Cacao [ICCO], 2013; como se citó en Arvelo et al., 2017). El sistema tradicional de clasificación, que todavía se utiliza, categoriza principalmente los cultivares de cacao en tres tipologías, de las cuales se derivan las variedades, híbridos y clones que se cultivan en todo el mundo, estas tipologías son conocidas como criollos, forasteros y trinitarios (Arvelo et al., 2017). Las condiciones ambientales son de suma importancia para el cultivo de cacao, ya que influyen directamente en su desarrollo, floración y producción de frutos, estas condiciones óptimas incluyen una temperatura que oscila entre los 23 y 32 °C, un nivel de precipitaciones anuales de 1 600 a 2 500 mm, altitudes que varían de 0 a 800 metros sobre el nivel del mar (msnm), una humedad relativa que se sitúa en el rango del 70 al 80 %, y la presencia de suelos aluviales, franco y profundos (Programa para el Desarrollo de la Amazonía [PROAMAZONÍA], 2003); como se citó en Arvelo et al., 2017).

2.1.2. Importancia social, ambiental y económica del cacao

El cacao representa una fuente significativa de ingresos para las familias productoras, al tiempo que forma parte fundamental de su dieta alimentaria. Además, contribuye de manera importante a la soberanía alimentaria, ya que contiene nutrientes esenciales para el sano desarrollo de las familias. Su cultivo no exige grandes inversiones económicas en términos de establecimiento y manejo, lo que lo convierte en una atractiva alternativa productiva. Los árboles de cacao y las especies utilizadas como sombra permanente desempeñan un papel clave en la protección del suelo contra la erosión y la proliferación de malezas, lo que reduce la necesidad de control. También mantendrá un clima equilibrado en la plantación y mejorará el contenido de materia orgánica del suelo a medida que las hojas caídas se descompongan. Esto facilita una mayor infiltración de agua en el suelo y contribuye a la restauración de los mantos acuíferos, además de proteger de las cuencas hidrográficas. Si se utilizan leguminosas como árboles de sombra, pueden ayudar a fijar nitrógeno en el suelo. Los sistemas de producción de cacao también funcionan como hábitats y refugios para la biodiversidad. Para las familias productoras, el cacao representa un negocio rentable debido a

la alta demanda constante de sus granos y a la estabilidad de los precios en el mercado, en contraste con otros cultivos como el café o el frijol, que pueden experimentar variaciones en los precios y enfrentar mayores riesgos de pérdida de producción, especialmente en las regiones tropicales húmedas (Estrada et al., 2011).

2.1.3. Rendimiento del cacao en el Perú

En cuanto al rendimiento promedio del cacao por regiones, se registró un promedio de 720 kg/ha en el año 2015, entre las regiones que sobresalen por su alta productividad, la región Pasco lidera con 1 154 kg/ha, seguida por Cajamarca con 1 059 kg/ha, sin embargo, es importante destacar que esta elevada productividad no se traduce necesariamente en una contribución significativa a la producción nacional, ya que representan apenas un 1 % cada una en términos de participación en la producción total a nivel nacional (Hernández, 2016). La región San Martín presenta un rendimiento de 815 kg/ha, mientras que la región Junín registra un rendimiento ligeramente superior con 924 kg/ha. En contraste, la Región Cusco, que solía ser el principal productor nacional en décadas anteriores, muestra el rendimiento más bajo a nivel nacional con 366 kg/ha, esta disminución en la productividad se debe a la presencia de ciertas enfermedades que están afectando sus plantaciones de cacao, el Gobierno Regional de Cusco ha informado que está implementando una serie de medidas a mediano plazo con el objetivo de mitigar esta plaga y mejorar la situación del cultivo de cacao en la región (Hernández, 2016).

Mendoza (2018) manifiesta que el crecimiento en la producción de cacao se ha visto impulsado principalmente por el aumento en los rendimientos productivos del cultivo, en la actualidad, el rendimiento promedio es de 800 kg/ha, lo que representa un incremento notable, sin embargo, a pesar de que estos rendimientos son mejores que el promedio regional, aún no se alcanzan los niveles deseados, la meta mínima a alcanzar es de 1 100 kg/ha, un objetivo que no resulta difícil de lograr si se coordinan esfuerzos en esta dirección. Es importante destacar que la producción nacional de cacao ha experimentado un crecimiento significativo, aumentando en un 440 % en un período relativamente corto, en 2007, la producción era de 20 000 t/año, y para 2016, se situó entre 108 000 y 140 000 t/año, esto refleja un crecimiento anual sostenido del 10 al 12 %, lo que indica un fuerte compromiso y esfuerzo tanto por parte de los productores como de las instituciones públicas y privadas involucradas en la industria del cacao. El Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI, 2017), afirma que el cultivo de cacao ha adquirido una relevancia significativa en el país, ya que la alta producción registrada en 2017, alcanzando las 120 000 t/año, ha tenido un impacto positivo en la mejora de las condiciones de vida de más de 90,000 familias agrícolas en la región amazónica

del Perú. Este cultivo ha desempeñado un papel fundamental en la lucha contra la pobreza y en el sustento de numerosas comunidades.

2.2. Metales pesados en suelos agrícolas

Los elementos químicos como el boro (B), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), Cd y otros, son potencialmente contaminantes y pueden tener efectos devastadores en el medio ambiente. Esto ocurre cuando se presentan en altas concentraciones o se depositan en el aire, el agua, el suelo y las plantas, en la mayoría de los suelos agrícolas, se encuentran presentes pequeñas cantidades de estos elementos de forma natural, cuando estos elementos se encuentran en concentraciones normales, pueden ser beneficiosos para el crecimiento de las plantas, especialmente en sus etapas iniciales de desarrollo, por esta razón, la aplicación de estos elementos a través de fertilizantes o abonos químicos es una práctica común en las zonas agrícolas de todo el mundo. Sin embargo, es esencial realizar un manejo adecuado y controlado de estos productos para evitar la contaminación y los efectos negativos en el entorno (Acosta, 2007).

2.2.1. Identificación de algunos metales pesados

Estos elementos químicos constituyen una fuente de contaminación no puntual significativa, ya que pueden contribuir a la acumulación de estos contaminantes en el suelo, esto, a su vez, facilita la transferencia de estos elementos a lo largo de la cadena trófica, que incluye el suelo, las plantas y, finalmente, los consumidores, este fenómeno es especialmente relevante en regiones donde las prácticas agrícolas se llevan a cabo de manera intensiva, sin períodos de descanso o rotación de cultivos que pueden ayudar a mitigar la acumulación de estos elementos y reducir su impacto en el medio ambiente, por lo tanto, es importante gestionar cuidadosamente el uso de fertilizantes y abonos químicos para minimizar los riesgos asociados a la contaminación y la acumulación de estos elementos en el suelo y la cadena alimentaria (Mahecha et al., 2015)

Se ha identificado que ciertos metales pesados están directamente relacionados con fuentes específicas, lo que significa que provienen principalmente de estas fuentes particulares. Fertilizantes: los metales pesados como el Cd, cromo (Cr), molibdeno (Mo), plomo (Pb) y zinc (Zn) pueden estar presentes en fertilizantes y abonos químicos utilizados en la agricultura. Plaguicidas: Los plaguicidas pueden contener metales pesados como el cobre (Cu), arsénico (As), mercurio (Hg), plomo (Pb), manganeso (Mn) y zinc (Zn) como componentes o contaminantes. Compost derivado de residuos sólidos convencionales: El compost producido a partir de residuos sólidos convencionales puede contener metales pesados como el Cd, cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), que provienen de los materiales

de diseño. Estiércol: El estiércol de animales puede contener metales pesados como el cobre (Cu), arsénico (As) y zinc (Zn), que se acumulan en el estiércol a través de la dieta de los animales y otros factores (Laegreid et al., 1999, como se citó en Mahecha et al., 2015). Estas fuentes específicas de metales pesados pueden representar riesgos para la contaminación del suelo y la cadena alimentaria si no se gestionan adecuadamente, es importante realizar un manejo responsable de estos materiales y controlar su uso en la agricultura para prevenir la acumulación excesiva de metales pesados en el entorno agrícola y minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente (Mahecha et al., 2015). Los fertilizantes fosforados pueden ser una fuente de Cd debido a la presencia de apatita en su composición. La apatita, además de aportar fósforo (P), puede contener Cd en concentraciones que varían entre 8 y 500 ppm, esto significa que el uso de fertilizantes fosforados puede introducir Cd en el suelo como un contaminante, además, las aguas de riego utilizadas en la agricultura, especialmente aquellas provenientes de sistemas de tratamiento o fuentes contaminadas, también pueden aportar metales al suelo, incluyendo el Cd (Bonomelli et al., 2003).

Según el estudio de Mahecha et al. (2015) sobre el contenido de metales pesados en suelos agrícolas, se observa que los contenidos de metales pesados siguen la siguiente secuencia: Zinc (Zn) > Cobre (Cu) > Plomo (Pb) > Cromo (Cr) > Níquel (Ni), en cuanto al Cd, aunque también fue analizado, su concentración no superó los límites de cuantificación en el estudio, sin embargo, es importante tener en cuenta que el Cd es un metal tóxico, y aunque no se haya detectado en niveles preocupantes en este estudio, su toxicidad se manifiesta en concentraciones mucho más bajas que los límites de cuantificación utilizados, lo que resalta la importancia de monitorear y controlar su presencia en suelos agrícolas para prevenir riesgos para la salud y el medio ambiente.

2.2.2. Contaminación del suelo

Los metales pesados pueden participar en una serie de procesos una vez que son incorporados en el suelo, estos procesos pueden llevarse a ser parte del ciclo del agua o a acumularse en tejidos vegetales o en el propio suelo como resultado de diversas transformaciones químicas. Acosta (2007) determina que algunos de los procesos involucrados incluyen: Adsorción: los metales pesados pueden unirse a las partículas del suelo a través de procesos de adsorción, lo que significa que se adhieren a la superficie de las partículas del suelo y quedan retenidos en ellas. Solubilización: En ciertas condiciones, los metales pesados pueden disolverse en el agua del suelo, lo que facilita su movilidad y transporte en el entorno. Precipitación: los metales pesados también pueden precipitar o formar sólidos insolubles en

ciertas condiciones químicas, lo que los inmoviliza en el suelo y evita su lixiviación hacia aguas subterráneas. Cambios en el estado de oxidación.

Las características físicas y químicas del suelo desempeñan un papel fundamental en la concentración y disposición de metales pesados en el entorno, estas características pueden variar significativamente de un lugar a otro, lo que hace que sea difícil establecer un patrón universal de bioacumulación y captación de metales pesados por parte de las plantas y los animales (Acosta, 2007) establece algunos de los factores del suelo que influyen en la bioacumulación de metales pesados: pH del suelo: puede afectar la solubilidad de los metales pesados. Algunos metales son más solubles en suelos ácidos, mientras que otros lo son en suelos alcalinos. Contenido de MO: en el suelo puede influir en la adsorción y retención de metales pesados, actuando como un agente de complejación. Textura del suelo: se refiere a la proporción de partículas de arena, limo y arcilla, puede afectar la retención y la movilidad de los metales pesados. Contenido de minerales y arcillas de absorción: tienen una alta capacidad de adsorción de metales pesados, lo que puede influir en su disponibilidad para las plantas. Oxidación y reducción: Las condiciones de oxidación y reducción en el suelo pueden afectar la solubilidad y la movilidad de ciertos metales pesados.

2.2.3. Movilidad de metales pesados en el suelo

Es cierto que los metales pesados en el ambiente, ya sea en el suelo o en los organismos, se caracterizan por su capacidad de bioacumulación, su transferencia a lo largo de la cadena alimentaria, su potencial tóxico y sus efectos adversos, estos aspectos han sido ampliamente estudiados (Acosta, 2007). Es importante destacar que la presencia de un elemento en el suelo no garantiza necesariamente que esté disponible para las plantas, la absorción de estos elementos por las plantas depende de una serie de factores, incluidas las características físicas y químicas del suelo. Algunos de estos factores incluyen el pH del suelo, la presencia de MO, la textura del suelo y la capacidad de los metales para formar complejos químicos con otros componentes del suelo (Pérez, 2017), es esencial para evaluar el riesgo de contaminación por metales pesados en el suelo y para implementar estrategias de manejo adecuadas que minimicen los efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente (Rodríguez et al., 2019).

2.2.4. Cadmio

Se representa con el símbolo químico Cd y pertenece al Grupo II B de la tabla periódica. Es un metal de color blanco brillante, que posee propiedades como ser dúctil, maleable y resistente a la corrosión, su densidad es de aproximadamente 8,642 g/cm³, y sus vapores son 3,88 veces más densos que el aire. Tiene una presión de vapor relativamente alta, lo que significa que puede evaporarse fácilmente y pasar al estado de vapor, cuando se

encuentra en este estado, se oxida rápidamente, formando óxido de cadmio (CdO), este CdO puede permanecer en el aire, en presencia de gases o vapores reactivos en la atmósfera, como dióxido de azufre (SO₂) o dióxido de carbono (CO₂), el Cd puede reaccionar con ellos para formar carbonato, sulfito (Na₂SO₃), hidróxido (OH⁻) sulfato (SO₄²⁻) y cloruro de cadmio (CdCl₂), dependiendo de las condiciones y los elementos químicos presentes en el entorno. Estas reacciones pueden tener implicaciones importantes para la contaminación ambiental y la toxicidad del Cd en diferentes contextos (Raraz, 2015).

Es cierto que el Cd existe de forma natural en el suelo en concentraciones generalmente inferiores a 1 ppm y suele estar asociado al zinc (Zn), en la solución del suelo, la forma principal del cd es el ion Cd²⁺. Además del ion Cd²⁺, puede formar una serie de iones complejos en la solución del suelo. Algunos de estos iones complejos incluyen: CdCl⁺, CdOH⁺, CdHCO₃⁺, CdCl₃⁻, CdCl₄²⁻, Cd(OH)₃⁻ y Cd(OH)₄²⁻. Estos complejos pueden influir en la movilidad, la disponibilidad y la toxicidad del cd en el suelo, la formación de complejos orgánicos también puede desempeñar un papel en la química del Cd en el suelo y en su interacción con las plantas y otros organismos, la comprensión de estas formas y complejidades químicas es esencial para evaluar el riesgo de contaminación por Cd en el suelo y para desarrollar estrategias de gestión adecuadas (Hernández, 2012). En suelos contaminados, las especies de Cd soluble predominantes suelen ser el ion libre Cd²⁺, junto con otras especies neutras como CdSO₄ (sulfato de Cd) o CdCl₂ (Cloruro de Cd). Estas especies tienden a estar presentes en cantidades crecientes en suelos donde el pH es mayor a 6,5, es decir, en suelos alcalinos o ligeramente alcalinos.

El Cd no desempeña una función biológica esencial en los organismos, ni en las plantas ni en los animales, además, tanto el Cd en su forma libre como sus compuestos son altamente tóxicos para las plantas y los animales, la exposición a niveles elevados de Cd puede tener efectos adversos graves en la salud de los seres vivos, y su acumulación a lo largo de la cadena alimentaria puede representar un riesgo para la salud humana, por lo tanto, la gestión y control de la contaminación por Cd en el suelo y su presencia en la cadena alimentaria son de gran importancia para proteger la salud y el medio ambiente (Rodríguez et al., 2008). El Cd se obtiene como subproducto en el procesamiento de minerales de zinc (Zn), cobre (Cu) y plomo (Pb). Es un metal que se utiliza en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas, estas aplicaciones industriales del Cd son importantes, pero también es fundamental gestionar adecuadamente su uso y disposición para evitar la contaminación y minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente (Izquierdo, 1998).

El Cd es un elemento que tiende a ser más móvil en comparación con otros metales como el Pb y Cu en el suelo, esto se debe a su baja afinidad por las formas adsorbentes en el suelo. Las formas más comunes de Cd son solubles o se encuentran adsorbidas en la fase sólida del suelo, lo que evita su precipitación en la mayoría de los tipos de suelos; es importante destacar que en suelos con pH elevado (Alcalinos) y en presencia de ciertas condiciones químicas, pueden encontrarse cantidades extremadamente altas de Cd en forma de fosfatos y carbonatos, esta acumulación de Cd en forma de fosfatos es especialmente relevante en suelos agrícolas, ya que los fertilizantes fosforados pueden contribuir a la liberación de Cd y su posterior absorción por las plantas; la movilidad y disponibilidad del Cd en el suelo dependen en gran medida de las características específicas del suelo y las condiciones ambientales locales, por lo tanto, es importante realizar un monitoreo y manejo adecuado del Cd en suelos para prevenir la contaminación y minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente (Reyes y Barreto, 2010).

Es cierto que, por lo general, la adsorción del Cd tiende a aumentar a medida que se incrementa el pH del suelo; sin embargo, otros factores, como la composición de la MO y la fase mineral del suelo, también desempeñan un papel significativo en la especiación y la retención del Cd en el suelo (Reyes y Barreto, 2010). Algunos ejemplos de cómo estos factores influyen en la adsorción del Cd incluyen: Contenido de MO: los suelos con altos contenidos de MO tienden a tener una mayor capacidad de adsorción de Cd; la MO puede formar complejos con el Cd, lo que facilita su retención en el suelo. Óxidos de hierro: la presencia de óxidos de hierro en el suelo también puede aumentar la adsorción de Cd, los óxidos de hierro tienen una alta afinidad por el Cd y pueden formar complejos con este metal. Tipo de arcillas: los suelos con diferentes tipos de arcillas (por ejemplo, arcillas tipo 2:1 y arcillas tipo 1:1) pueden tener comportamientos diferentes en relación con la adsorción de Cd; aunque los suelos con arcillas tipo 2:1 pueden tener una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), no necesariamente retienen más Cd que los suelos con otros tipos de arcillas debido a las interacciones químicas específicas entre el Cd y las partículas del suelo (Lofts et al. 2005; Lis et al. 2003; Lombi et al. 2003; Alloway, 1995; como se citó en Reyes y Barreto, 2010).

En resumen, la adsorción y retención del Cd en el suelo son resultado de una interacción compleja entre el pH del suelo, la MO, los óxidos minerales y la composición de las arcillas. Estos factores influyen en la disponibilidad y movilidad del Cd en el suelo, y es importante considerarlos al evaluar los riesgos de contaminación por Cd y al implementar prácticas de manejo adecuadas (Reyes y Barreto, 2010).

2.2.5. Origen del cadmio

A. Fuentes naturales. El origen natural del Cd en el suelo se relaciona principalmente con procesos geológicos y geofísicos (Sánchez, 2016), a continuación, se describen algunas de las fuentes y procesos naturales que contribuyen a la presencia de Cd en el suelo: Descomposición de minerales: el Cd puede liberarse en el suelo a partir de la separación de minerales que contienen Cd en su composición, por ejemplo, minerales como la esfalerita (una fuente de zinc) y la greenockita son minerales de azufre de Cd que pueden liberar Cd en el suelo a medida que se descomponen. Procesos geológicos: los procesos geológicos naturales, como la erosión de rocas y minerales que contienen Cd, pueden contribuir a la liberación de este elemento en el suelo, a lo largo de millones de años, la acción de la intemperie, la erosión y la deposición puede llevar a la dispersión del Cd en diferentes áreas del suelo. Actividad volcánica: las erupciones volcánicas pueden liberar Cd y otros metales pesados en forma de gases y partículas, que luego se depositan en el suelo circundante, esto puede dar lugar a concentraciones elevadas de Cd en áreas volcánicas o cercanas a volcanes. Depósitos sedimentarios: A lo largo del tiempo geológico, los sedimentos depositados en cuencas fluviales (Kabata-Pendias, 2000; como se citó en Sánchez, 2016).

B. Fuentes antropogénicas. El Cd también puede ingresar al suelo como resultado de actividades humanas, lo que se conoce como origen antropogénico, estas actividades pueden incluir: Minería: la extracción y procesamiento de minerales que contienen Cd, como la esfalerita (mineral de zinc), puede liberar Cd en el suelo y el entorno circundante. Fundición: la fundición de minerales metálicos, como el zinc y el plomo, a menudo libera Cd como subproducto, los contaminantes atmosféricos pueden depositarse en el suelo a través de la deposición de partículas. Agricultura: el uso de fertilizantes fosfatados que contienen Cd puede aumentar la concentración de Cd en el suelo agrícola, también, algunas prácticas agrícolas, como el uso de aguas residuales o lodos depuradora para el riego de cultivos (Gálvao et al, 1987; como se citó en Sánchez, 2016).

2.2.6. Fuentes de exposición al cadmio

La exposición al Cd puede ocurrir a través de diversas fuentes en la vida cotidiana. Algunas de las principales fuentes de exposición al Cd incluyen: Alimentos: la ingesta de alimentos contaminados con Cd es una de las fuentes más comunes de exposición; el Cd puede estar presente en el suelo y ser absorbido por las plantas que luego son consumidas por los seres humanos, los alimentos que suelen contener Cd incluyen cereales, vegetales de hojas verdes, frutos secos, mariscos y algunos alimentos procesados. Agua potable: en áreas donde el agua subterránea contiene Cd, la ingesta de agua contaminada puede ser una fuente de

exposición. Tabaco: el humo del tabaco es una fuente importante de exposición al Cd; presente en el suelo es absorbido por las hojas de tabaco y luego inhalado por los fumadores. Ambiente laboral: las personas que trabajan en industrias relacionadas con la metalurgia, la soldadura, la fabricación de baterías y la minería pueden estar expuestas al Cd (Raraz, 2015)

2.2.7. Cadmio en las plantas

Es cierto que, en las células vegetales, la entrada y el transporte del Cd están mediados por proteínas específicas; entre las proteínas responsables de facilitar la entrada de Cd en las células vegetales se destacan: Transportador de calcio LCT1: este transportador también puede transportar Cd, ya que comparte similitudes estructurales con los transportadores de calcio. Proteína IRT1 (Iron-Regulated Transporter 1): aunque su función principal es la absorción de hierro, la proteína IRT1 también puede estar involucrada en la captación de Cd en algunas plantas, esta proteína regula la absorción de hierro y puede ser inducida por la presencia de Cd en el suelo. Una vez que el Cd ingresa a las células vegetales, tiende a acumularse preferentemente en la raíz de la planta, esto se debe a que las raíces son las primeras en entrar en contacto con el Cd presente en el suelo, el Cd se secuestra en las vacuolas de las células radicales, lo que ayuda a limitar su movilidad y toxicidad en la parte aérea de la planta (Rodríguez et al., 2008).

Es correcto que el Cd puede utilizar transportadores de otros metales como el calcio (Ca^{2+}), el hierro (Fe^{2+}), y el zinc (Zn^{2+}) para penetrar en las células vegetales, estos transportadores pueden facilitar la entrada de Cd en las células, ya que comparten similitudes estructurales y funcionales con los transportadores de metales esenciales como el hierro y el zinc; una vez que el Cd ha ingresado a las células radicales de la planta, puede unirse inicialmente a la pared celular de las células epidérmicas, sin embargo, para su posterior transporte dentro de la planta, el Cd se moviliza a través de intercambio iónico con otros cationes metálicos, como el calcio, el hierro y el zinc, esto significa que el Cd puede competir con estos cationes en la captura y el transporte a través de la planta; la capacidad del Cd para utilizar los mismos transportadores que otros metales esenciales puede plantear desafíos para la planta, ya que la acumulación excesiva de Cd puede interferir con la absorción y el transporte de estos metales esenciales, lo que puede afectar negativamente la salud de la planta. y su capacidad para llevar a cabo funciones vitales (Pernía et al., 2008).

Es correcto que el Cd se considera un elemento que puede translocarse fácilmente dentro de las plantas, lo que significa que puede moverse desde las raíces hasta la parte superior de la planta, incluyendo tallos, hojas y flores. Sin embargo, la capacidad de absorción y distribución de los metales, incluido el Cd, puede variar entre diferentes especies

de plantas. La acumulación y distribución del Cd en las plantas puede seguir un patrón específico que varía según la especie, esto puede deberse a diferencias en la fisiología y la bioquímica de las plantas, así como a la capacidad de las especies para movilizar y almacenar metales pesados de manera diferente. En el lino (*Linum usitatissimum*), la acumulación de Cd sigue el orden: raíces > tallos > hojas > flores y en el cáñamo (*Cannabis sativa*), la acumulación de Cd sigue un orden diferente: flores > raíces > tallos > hojas. Estas diferencias en la acumulación de Cd pueden ser el resultado de las características genéticas y fisiológicas particulares de cada especie, así como de las condiciones ambientales en las que crecen; esto destaca la importancia de comprender cómo diferentes plantas pueden interactuar con metales pesados como el Cd y cómo estas interacciones pueden variar según la especie (Inés, 2011).

a. Absorción de cadmio por las plantas. tienen la capacidad de absorber metales del suelo en el que crecen, pero la cantidad y la eficiencia de absorción pueden variar significativamente según la especie vegetal y las condiciones del suelo (Prieto et al., 2009). Se acumula en la capa superior del suelo, lo que facilita su disponibilidad para ser absorbido por las raíces de las plantas (González et al., 2010). La cantidad de Cd que las raíces pueden absorber está relacionada con la concentración de este metal en el suelo (Pernía et al., 2008).

b. Cadmio en diferentes órganos del cultivo de cacao. Mite et al. (2010), condujeron investigaciones sobre los niveles de Cd en almendras de cacao, suelo y agua, y detectaron concentraciones medias de Cd en cáscaras, hojas, almendras y cubiertas de cacao de aproximadamente 1,01; 1,01; 0,84 y 1,60 ppm, respectivamente. Tantalean y Huauya (2017), en su estudio acerca de la distribución del contenido de Cd en diversos órganos del cacao CCN-51 en suelos aluvial y residual, llegaron a la conclusión de que el tallo exhibe la concentración más alta de Cd, seguido por las hojas, las raíces, las almendras y las cáscaras.

2.3. Materia orgánica del suelo

Desempeña una función fundamental en la fertilidad de los suelos al proporcionar nutrientes esenciales para las plantas y servir como fuente de energía para los microorganismos, MOS también participa en una amplia variedad de procesos biológicos, químicos y físicos que involucran diversas reacciones reguladas o influenciadas por ella; estas funciones incluyen intercambio iónico, reacciones de oxidación-reducción, capacidad de amortiguación, formación de complejos con metales y adsorción de compuestos orgánicos naturales o sustancias extrañas al ambiente (Sales, 2006).

2.3.1. Origen y composición de la materia orgánica del suelo

El suelo recibe una amplia variedad de restos orgánicos de diferentes fuentes, estos restos, que provienen de plantas superiores, llegan al suelo de dos maneras:

algunos se depositan en la superficie, como hojas, ramas, flores y frutos, mientras que otros quedan directamente en la masa del suelo cuando las raíces mueren; además, el plasma microbiano y los restos de la fauna que habita en el suelo también son fuentes significativas de MO, inmediatamente después de que estos materiales caen al suelo, y en muchas ocasiones incluso antes, comienza un proceso de procesamiento rápido facilitado por macro y microorganismos que utilizan los residuos orgánicos como fuente de energía, durante este proceso de análisis, se libera dióxido de carbono (CO₂) y se liberan los nutrientes contenidos en los residuos orgánicos (Bonilla, 2021).

2.3.2. Importancia de la materia orgánica del suelo

Es un componente fundamental en la composición del suelo, y aunque a menudo se la considera como un solo compuesto, su naturaleza es muy diversa, proviene de la descomposición de animales, plantas y microorganismos que se encuentran en el suelo o en materiales externos al sitio, aunque no existe una definición única de MOS, generalmente se refiere a cualquier tipo de material de origen animal o vegetal que regresa al suelo después de someterse a un proceso de descomposición que involucra la actividad de microorganismos, esto puede incluir hojas, raíces en análisis, exudados, estiércol, orina, plumas, pelo, huesos, animales muertos y productos de microorganismos, como bacterias, hongos y nematodos, que aportan sustancias orgánicas o sus propias células al suelo al morir; estos materiales inician un proceso de descomposición o mineralización, transformándose de su forma orgánica, que corresponde a seres vivos, a su forma inorgánica, que puede ser mineral, soluble o insoluble, circulan a través de la solución del suelo y finalmente son utilizados por las plantas y otros organismos o se estabilizan hasta convertirse en humus a través del proceso de humificación; el contenido de MO varía en un rango de 2 a 8 g de MOS/kg de suelo, siendo más bajo en regiones desérticas y más alto en áreas como las turberas, en suelos minerales típicos, el contenido de MOS en el horizonte superficial generalmente oscila entre 10 y 40 g/kg de suelo (Magdoff y Weil, 2004; como se citó en Román et al., 2013).

2.3.3. Efectos benéficos de la materia orgánica del suelo

Son ampliamente reconocidos, muchos de estos beneficios se han documentado de manera sólida, aunque algunos efectos están íntimamente ligados a otros factores del suelo, lo que hace difícil atribuir exclusivamente a la MOS ciertos efectos positivos en la fertilidad del suelo, es particularmente relevante destacar el impacto significativo que la MOS tiene en los suelos altamente meteorizados, ya que se ha comprobado que incluso aumentos mínimos de MOS tienen efectos beneficiosos en simultáneo sobre las propiedades

físicas, químicas y biológicas del suelo, a pesar de que la interacción de estas tres propiedades complica la evaluación cuantitativa del efecto positivo de la MOS (Bonilla, 2021).

Es importante tener en cuenta que la cantidad de MOS no solo depende de la actividad de los microorganismos presentes en el suelo, sino también de factores como el tipo de suelo, la vegetación, las condiciones ambientales como la humedad y la temperatura, así como el aumento de las precipitaciones o el riego; en condiciones de temperatura moderada, los microorganismos se multiplican, consumen más MOS y la descomposición de esta MO es continua; por lo tanto, la aplicación de MOS debe ser una práctica constante, con el objetivo no solo de aumentar el porcentaje de MOS o de proporcionar alimento a los microorganismos del suelo, sino también de aprovechar los diversos beneficios que aporta a la salud general del suelo (Julca-Otiniano., 2006).

2.3.4. Formas de materia orgánica del suelo

La clasificación de la MOS es un proceso complejo debido a que involucra una mezcla altamente heterogénea de componentes biogénicos que varían en proporciones y estados de evolución significativos. Sales (2006) sin embargo, desde una perspectiva genética, se pueden distinguir tres formas principales de MOS: Restos vegetales y animales en proceso de división microbiana (que constituyen aproximadamente el 1-10 % del total), estos materiales se encuentran en el suelo en forma libre o están débilmente asociados a la fracción mineral a través de enlaces lábiles, principalmente de naturaleza física. Sustancias no húmicas (que representan alrededor del 10-40 %), estas sustancias orgánicas pueden clasificarse en categorías bioquímicas conocidas, como polisacáridos, ligninas, polímeros lipídicos, proteínas, resinas, pigmentos, entre otros; en su mayoría, tienen origen vegetal, aunque también pueden ser producidas por la comunidad microbiana del suelo, donde actúan como una fuente principal de energía. Sustancias húmicas (SH) (que comprenden aproximadamente el 40-60 % del total de MOS), las sustancias húmicas constituyen el principal reservorio de carbono (C) en los suelos y desempeñan un papel fundamental en la retención y liberación de nutrientes, así como en la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo.

2.3.5. Mineralización de nutrimentos de la materia orgánica del suelo

Una de las contribuciones más significativas de la MO a la fertilidad del suelo es su capacidad para suministrar nutrientes esenciales, especialmente nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), la MO actúa como un reservorio de nutrientes que pueden ser liberados o retenidos en el suelo a través de dos procesos distintos: procesos biológicos, que involucran a microorganismos, y procesos químicos, que afectan a nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K); para comprender mejor estos procesos, es importante mencionar conceptos

clave como la mineralización e inmovilización, la mineralización comprende una serie de procesos mediante los cuales, junto con la MO, el nitrógeno y el fósforo, entre otros, se transforman en moléculas inorgánicas de estructura más simple (Bonilla, 2021).

2.3.6. Asociación de la materia orgánica del suelo con los metales pesados

Los vínculos entre metales en el suelo se establecen mediante fuerzas de atracción electrostática, interacciones entre iones y moléculas dipolares, y la formación de complejos, en general, en el suelo, los metales pesados pueden unirse a diversos ligandos, tanto orgánicos como inorgánicos, dando lugar a la formación de complejos, esto implica que los cationes de carga múltiple desempeñan un papel significativo en la agregación y coagulación de la MO y los coloides minerales en el suelo; se han documentado múltiples pruebas que respaldan la formación de complejos entre ácidos fúlvicos y húmicos con cationes divalentes y trivalentes (Amery et al. 2007; Stevenson, 1982; como se citó en Reyes y Barreto, 2010). La calidad de la MOS desempeña un papel crucial en lo que respecta a la acumulación y liberación de metales pesados, y esto tiene importantes implicaciones por varias razones; en primer lugar, la MOS tiene una capacidad notable para acumular metales pesados, y cuando estos se liberan de la MOS, pueden entrar en contacto directo con las plantas, esto plantea preocupaciones significativas en términos de seguridad alimentaria, ya que los metales pesados pueden ser consumidos por animales y humanos a través de la cadena alimentaria; además, existe una relación estrecha entre la MOS y la presencia de metales pesados en el suelo, la MOS influye de manera sustancial en el destino de los metales en el suelo, ya su vez, la presencia de metales pesados puede alterar notablemente la naturaleza y dinámica de la MOS; con el tiempo, esto puede tener efectos adversos en las condiciones biológicas tanto de los organismos del suelo como de las plantas (Gutiérrez et al., 2011; Juhasz et al., 2010; Liu et al., 2010; Knapp et al., 2010; Vogeler y Thayalakumaran, 2005; Weng, et al., 2002; Alloway, 1995; Schulin et al., 1995; Grathwohl, 1990; como se citó en Reyes y Barreto, 2010). La composición de la MOS y sus interacciones ejercen una influencia notoria en las propiedades físicas del suelo, tiene la capacidad de formar enlaces estables entre polímeros orgánicos y minerales, lo que contribuye a la formación y estabilización de la estructura del suelo; dado que la MO se encuentra concentrada principalmente en la capa superior del suelo y en la rizosfera, su presencia tiene un impacto directo en la actividad biológica y el crecimiento de las plantas, esto se debe a que la MO desempeña un papel significativo en la regulación de procesos relacionados con el intercambio de masa y energía, como la infiltración de agua, la evaporación, la transpiración y el intercambio de calor (Stevenson, 1982; como se citó en Reyes y Barreto, 2010).

2.3.7. Asociación de cadmio con materia orgánica del suelo

Se ha observado que la energía de unión entre el Cd y MO es mayor que la que se da entre el Cd y las arcillas; la cantidad de Cd que las plantas absorben está influenciada por las características del suelo, como su pH y contenido de MO, así como por las especies de plantas presentes; para simplificar, podemos considerar que la concentración de Cd en los cultivos varía de manera proporcional a la concentración de Cd en el suelo, además, es importante destacar que la composición de la MO y la fase mineral del suelo, junto con el pH, ejercen un impacto significativo en el proceso de adsorción del Cd (Sánchez, 2016). La MO soluble altera la disponibilidad de metales pesados en la solución del suelo, y este efecto varía según el elemento metálico en cuestión, esto se refleja en cambios en la concentración de estos elementos en las partes aéreas y las raíces de las plantas. (Riveros, 2007; Bravo, 2014).

2.4. Antecedentes

Un estudio en la región San Martín, Perú, se centró en la acumulación de Cd en las plantaciones de cacao. Para abordar este problema, se recolectaron muestras de hojas, granos y suelo de fincas cacaoteras a diferentes altitudes (400, 600 y 800 msnm) y se analizaron en el laboratorio Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) para determinar los niveles de Cd. Los resultados, sometidos a un análisis estadístico, revelaron diferencias significativas entre las variables estudiadas; en resumen, se encontró que la concentración de Cd en las plantaciones de cacao ubicadas entre 600 y 800 msnm en San Martín superaba los límites permitidos por la OMS. Se sugiere la implementación de estrategias, como el uso de hongos micorrízicos arbusculares, para reducir la concentración de Cd en este cultivo en la zona (Mendoza-López et al., 2021)

En el estudio "Efecto de compost y NPK en los niveles de microorganismos y Cd en suelo y almendra de cacao", se observó que la población de microorganismos aerobios viables fue de alrededor de 104 UFC/g, los actinomicetos estuvieron en el rango de 104 a 105, mientras que los hongos y los fijadores de nitrógeno se encontraron en niveles cercanos a 103 UFC/g. En cuanto al Cd, se detectaron concentraciones en el suelo que variaron de 0,17 a 0,25 µg/g, y en las almendras oscilaron entre 0,31 y 0,43 µg/g. No se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos en relación a los diversos grupos microbianos, excepto en lo que respecta a los niveles de Cd en las almendras (Florida et al., 2019).

En el estudio sobre el "Efecto de la MO en el contenido de Cd en almendras de cacao orgánico en Perú", se llevaron a cabo experimentos en dos parcelas de diferente topografía, una planicie y otra colinosa. En estas parcelas se probaron diez tratamientos

diferentes, que incluyeron tres fuentes de MO a tres dosis distintas, además de un grupo de control. Se recopilaron muestras de suelo y almendras de cacao, las cuales se enviaron a un laboratorio para su análisis físico y químico siguiendo los procedimientos establecidos. En el caso de la fuente orgánica utilizada, que fue la cáscara de cacao aplicada a una dosis de 13,5 kg/planta en la localidad de Alto Huayhuante, se logró reducir el contenido de Cd en las almendras a 0,53 ppm, un valor cercano al límite permitido para la exportación (Huamaní y Huauya, 2018)

El estudio evaluó el fraccionamiento densimétrico y químico de la materia orgánica (MO) asociada al cadmio (Cd) en suelo aluvial y residual cacaotero. Se emplearon tres niveles de Cd y tres de MO, con suelos aluviales y residuales. Los resultados destacaron que la fracción densimétrica liviana libre (FLL) concentró el 62,74 % de Cd, seguida de la fracción liviana oclusa (FLO) con el 32,59 % y la fracción pesada (FP) con el 4,66 %. A medida que se aplicaba más MO, aumentaba la acumulación de Cd en la FLL, siendo el ácido fúlvico la fracción con mayor concentración de Cd, seguido por la humina y el ácido húmico. La relación entre las dosis de MO y Cd reveló que dosis más altas de MO incrementaban la retención de Cd en la FLL, reduciendo la absorción y acumulación de Cd en las hojas de las plantas de cacao. En suelos aluviales, la absorción de Cd por las plantas fue menor, y la dosis más efectiva para reducir esta absorción fue de 30 t/ha de MO. En suelos residuales, se registró una mayor absorción de Cd por parte de las plantas de cacao. (Ottos, 2018)

Según Tantalean y Huauya (2017), el estudio sobre la "Distribución del contenido de Cd en los diferentes órganos del Cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual" tenía como objetivo determinar las concentraciones de Cd en los diversos órganos de las plantas de cacao CCN-51 que crecían en suelos residuales, y aluviales. En ambos tipos de suelos, se reconocieron muestras de raíces, ramas, hojas, almendras y cáscaras de las plantas de cacao, se concluyó que el suelo aluvial presentaba un mayor contenido de Cd disponible, y en cuanto a los tejidos de las plantas, las ramas mostraban el mayor contenido de Cd total.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Esta investigación se llevó a cabo en el vivero de la Facultad de Agronomía, que se encuentra en la ciudad de Tingo María, específicamente en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, en la región de Huánuco. Las coordenadas UTM de esta ubicación son 390529.00 metros al este, 8970045.00 metros al norte, y la altitud es de 658 metros sobre el nivel del mar.

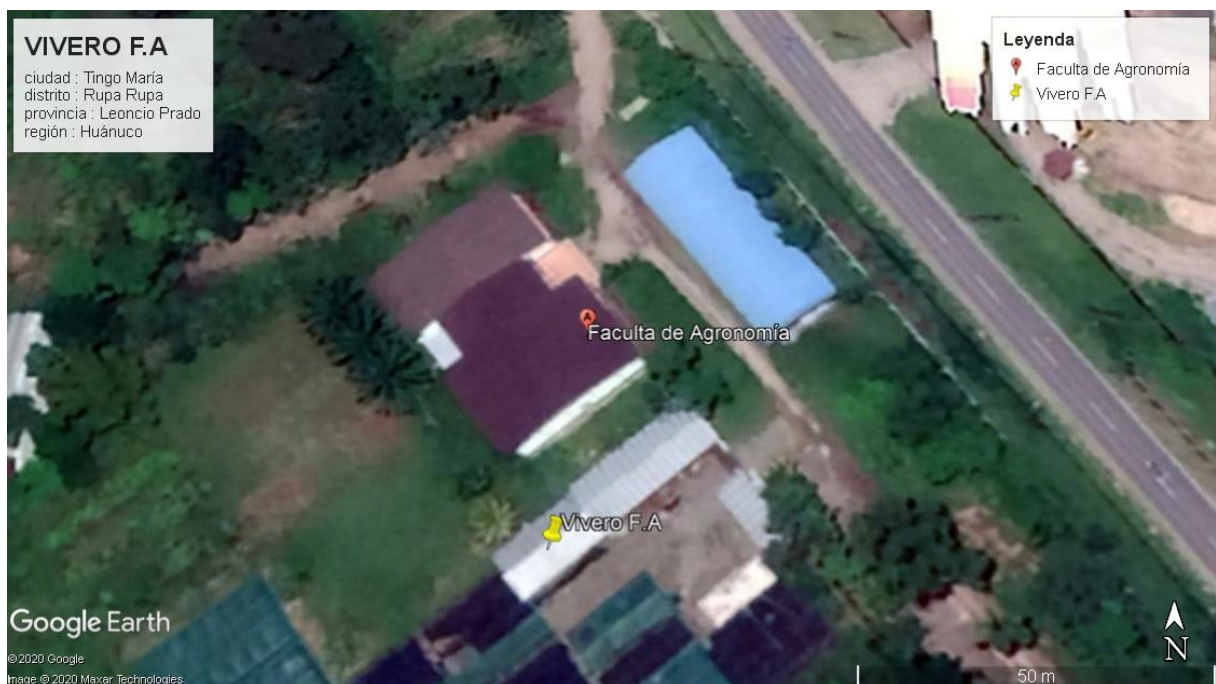


Figura 1. Ubicación del campo experimental

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Material y equipos

Para el desarrollo de la tesis, se utilizó: Se utilizó tierra agrícola, semillas de cacao clon CCN-51 debidamente seleccionadas y dos estiércoles (Vacuno y gallinaza). Para la instalación fue necesario el uso de materiales como: Bolsas 6 x 12x 0,02 cm; cucharón de plástico, pala, regadora, regla, vernier digital, entre otros.

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Análisis físico químico del suelo inicial

En la Tabla 1, se presenta los análisis físicos químicos del suelo seleccionado para el estudio, las cuales se observa un suelo con clase textural franco arcillo limoso,

Rucks et al. (2005) se indica que los suelos con una textura franco son óptimos, ya que poseen una proporción equilibrada de arena, limo y arcilla, lo que resulta en una combinación adecuada de capacidad de drenaje y retención de nutrientes. Además, se menciona que el pH del suelo es de 5,57, lo que indica que el suelo es ácido (Piedrahíta, 2009; Sadeghian, 2016). Para el porcentaje de MO, observamos un valor de 2,56 %. Andrade y Martínez (2014), manifiestan que para un suelo de textura franco el porcentaje de MO en el suelo mayor de 2,5 % se considera alto, tomando esta referencia manifestamos que el suelo seleccionado tiene alto contenido de MO. Respecto al P, se observa un valor de 26,07 ppm; Munera y Meza (2012) manifiesta que, según el método de extracción de fósforo (Olsen), los umbrales de P se denominan, bajo cuando el contenido de P es menor de 10 ppm, medio de 10 a 15 ppm y alto de 15 a 20 ppm, considerando la referencia, el contenido de P determinado en el suelo en estudio es muy alto. El contenido de K fue 119,5 ppm, según Guerrero (2012) refiere que valores menores a 120 ppm de K₂O son considerada bajo.

Tabla 1. Análisis físico químico del suelo inicial

Parámetros	Valores	Método empleado
Análisis físico:		
Clase textural	Franco arcillo limoso	Triangulo textural
Análisis químico:		
pH (1:1)	5,57	Potenciómetro
MO (%)	2,56	Walkey y Black
N (%)	0,13	% MO x 0.05
P (ppm)	26,07	Olsen Modificado
K ₂ O (ppm)	119,5	Acetato de amonio
Ca cambiante (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	5,31	EAA
Mg cambiante (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	1,05	EAA
K cambiante (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	--	EAA
Na cambiante (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	--	EAA
CIC (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	6,36	Suma de cationes
Al cambiante (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0	-
H cambiables (Cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0	-
Saturación de bases cambiables (%)	100	-
Cd ppm	2,76	EAA

Con respecto a los contenidos de Ca y Mg se observa valores de 5,31 y 1,05 Cmol(+)/kg. Valores que se consideran medios por el Instituto Colombiano Agropecuario; como se citó en Sadeghian (2012), se menciona que en el caso del calcio (Ca), valores por debajo de 3 Cmol(+)/kg se consideran bajos, mientras que en el rango de 3 a 6

Cmol(+)/kg se consideran medios, y valores por encima de 6 Cmol(+)/kg se consideran altos; en cuanto al magnesio (Mg), valores por debajo de 1,5 Cmol(+)/kg se consideran bajos, en el rango de 1,5 a 2,5 Cmol(+)/kg se consideran medios, y valores por encima de 2,5 Cmol(+)/kg se consideran altos, además, se señala que el contenido de bases cambiables es del 100 %.

3.2.2.2. Análisis químico del estiércol de vacuno y gallinaza

En la Tabla 2, se observa los análisis químicos de los materiales orgánicos; estiércol de vacuno y gallinaza, se determinó 65,94 y 69,81 % de MO; 41,18 y 37,84 % de Ca; 26,62 y 17,05 % de Mg, 7,79 y 5,95 % de K y 1,32 y 1,25 % de Na; Además, se observa contenidos de 5,77 y 14,10 ppm de Cd. Iglesias (s/a), refiere que el contenido de MO de vacuno es 68 g/kg y gallinaza es 115 gr/kg.

Tabla 2. Análisis químico de estiércol de vacuno y gallinaza

Muestra	Humedad	Base seca						
		MO	Ceniza	Ca	Mg	K	Na	Cd
		%	%	%	%	%	%	ppm
Estiércol de vacuno	4,53	65,9	34,1	41,2	26,6	7,79	1,32	5,77
Gallinaza	5,33	69,8	30,2	37,8	17,1	5,95	1,25	14,10

3.2.2.3. Análisis físicos químicos final del suelo (Sustrato)

En la Tabla 3, se presenta los resultados del análisis físico químico de los sustratos en estudio. Se observa que el suelo cambió en cuanto a la clase textura de franco limoso a franco por efecto del estiércol de vacuno y gallinaza. Con respecto al pH, se observa mayor acidez con respecto al tratamiento que no se aplicó material orgánico (T₀ y T₁). A diferencias de los tratamientos con material orgánico, incremento el pH hasta 7,10 y 7,14 cuando se aplicó dosis más altas de estiércol de vacuno y gallina alcanza, también se nota el incremento de K₂O CIC, Ca y Mg; esto significa que los incrementos en las características analizadas del suelo incrementan por efecto del estiércol de vacuno y gallinaza. Berríos (2015) indica que el estiércol se produce como un subproducto del proceso de digestión de la alimentación de los animales; la principal utilidad de la incorporación de estiércol incluye la aportación de nutrientes, el aumento de la capacidad de retención de humedad y la mejora de la actividad biológica en el suelo.

Tabla 3. Análisis físico químico de los sustratos al final del experimento

Clave	Textura	pH	MO	N	K ₂ O	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						Cadmio (ppm)	
		1:1	%	%	ppm		Ca	Mg	K	Na	Al	H	Disponible	Total
T ₀	Franco limoso	4,69	1,87	0,09	184,92	3,82	3,18	0,40	0,00	0,00	0,12	0,12	2,41	4,28
T ₁	Franco limoso	4,64	2,23	0,10	299,03	3,89	3,18	0,45	0,00	0,00	0,13	0,13	5,52	6,34
T ₂	Franco	6,41	3,33	0,15	308,86	6,89	4,82	1,40	0,40	0,27	0,00	0,00	7,88	9,04
T ₃	Franco	6,90	4,17	0,19	381,91	8,13	5,28	2,02	0,63	0,20	0,00	0,00	7,16	7,79
T ₄	Franco	7,10	4,43	0,20	330,03	9,38	5,42	2,38	1,23	0,34	0,00	0,00	6,45	7,58
T ₅	Franco	6,40	3,29	0,15	374,84	7,28	5,45	1,29	0,38	0,17	0,00	0,00	8,21	9,09
T ₆	Franco	7,14	3,96	0,18	367,67	7,14	4,76	1,45	0,73	0,20	0,00	0,00	7,24	8,33
T ₇	Franco	6,97	4,74	0,21	364,70	7,12	4,49	1,48	0,94	0,21	0,00	0,00	6,85	7,73

Leyenda:

- T₀: Testigo
- T₁: 10 PPM Cd
- T₂: 10 ppm Cd + 1,5 % MO Estiércol de vacuno
- T₃: 10 ppm Cd + 3 % MO Estiércol de vacuno
- T₄: 10 ppm Cd + 4,5 % MO Estiércol de vacuno
- T₅: 10 ppm Cd + 1,5 % MO Gallinaza
- T₆: 10 ppm Cd + 3 % MO Gallinaza
- T₇: 10 ppm Cd + 4,5 % MO Gallinaza

Asimismo, refiere que la gallinaza contiene todos los nutrientes básicos indispensables para las plantas (Berríos, 2015), menciona que, por lo general, el estiércol de aves es reconocido por ser especialmente rico en nutrientes, especialmente en nitrógeno total, fósforo y potasio (NPK). Igualmente, Duran (2000); como se citó en Berríos (2015), explica que la gallinaza se forma a partir de las heces de las aves, que se depositan en el material utilizado como cama, que generalmente consiste en residuos de madera con una pequeña cantidad de cal. El excremento diario de las aves equivale al 5 % de su peso corporal, y la gallinaza contiene aproximadamente un 80 % de MO (Gonzales, 2011), destaca que los fertilizantes orgánicos desempeñan un papel fundamental en la mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que los convierte en elementos de gran relevancia para el cultivo.

3.2.2.4. Componentes en estudio

Los componentes en estudio son: Abono orgánico (Estiércol de vacuno y gallinaza), plántones de cacao (CCN-51) y suelo contaminado con sulfato de cadmio (CdSO_4)

3.2.2.5. Tratamientos en estudio

En la Tabla 4, se observa ocho tratamientos, un tratamiento testigo absoluto (T_0), un tratamiento testigo con 10 ppm de Cd (T_1), los tratamientos T_2 , T_3 y T_4 están conformados por 10 ppm de Cd más 34, 68 y 102 g de estiércol de vacuno, asimismo, los tratamientos T_5 , T_6 y T_7 también están conformados por 10 ppm de Cd más 32, 64 y 96 g de gallinaza.

Tabla 4. Descripción de tratamientos en estudio

Tratamientos	Descripción	% de MO total
T_0	Testigo absoluto	0,00
T_1	10 ppm Cd	0,00
T_2	10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno	4,06
T_3	10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno	5,56
T_4	10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno	7,06
T_5	10 ppm Cd + 32 g Gallinaza	4,06
T_6	10 ppm Cd + 64 g Gallinaza	5,56
T_7	10 ppm Cd + 96 g Gallinaza	7,06

3.2.2.6. Diseño Experimental

Se empleó el diseño completamente al azar (DCA), el cual consistió en ocho tratamientos y seis repeticiones; al concluir el experimento, se efectuó el

análisis de varianza y se calculó el coeficiente de variación de los ensayos para cada una de las características evaluadas; en el caso de mostrar diferencias estadísticas, se procedió a analizar la comparación múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$). Asimismo, el análisis de regresión y correlación se realizará considerando la variable independiente (x) porcentaje (%) de MO en base a (Estiércol de vacuno y gallinaza) y la variable dependiente (y) concentración de Cd en el suelo y plántones de cacao.

El Modelo Aditivo Lineal

$$Y_{IJ} = \mu + \tau_I + \epsilon_{IJ}$$

Y_{IJ} = Respuesta del i-ésimo dosis de estiércol de vacuno y gallinaza en el j –ésimo repetición

μ = Efecto de la media general

τ_I = Efecto del i-ésimo dosis de estiércol de vacuno y gallinaza

ϵ_{IJ} = Error experimental presentado por el i-ésimo dosis de estiércol de vacuno y gallinaza en el j-ésimo repetición

Para:

i = 1, 2,....., 8 tratamientos

j = 1, 2,....., 6 repeticiones

3.2.2.7. Análisis de varianza

El esquema el análisis de varianza (Tabla 5)

Tabla 5. Esquema del análisis de varianza para un diseño completo al azar

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F.Cal.	F.Tab.
Tratamientos	t-1	SC _{trat}	CM _{trat}	CM _{trat} /CM _{ee}	F α (gl _{trat} ,gl _{ee})
Error experimental	(t)(r-1)	SC _{ee}	CM _{ee}		
Total	tr-1	SC _{total}			

3.2.2.8. Características del campo experimental

Tratamientos

- Número de tratamientos : 8
- Número de plantas/tratamiento : 6

- Número de plantas/repetición : 6
- Número de plántulas evaluadas : 24
- Total plántulas evaluadas en todo el experimento : 48

Parcelas

- Número total de parcelas : 1
- Largo de la parcela : 10 m
- Ancho de la parcela : 2 m
- Área de la parcela : 20 m²

3.2.3. Ejecución del experimento

3.2.3.1. Selección del suelo

Se utilizó información de análisis anteriores (Laboratorio de suelo de la Facultad de Agronomía UNAS) toda vez que se buscaba un suelo con contenidos altos de Cd, se extrajo suelo a una profundidad de 20 cm, aproximadamente de cinco partes del terreno, haciendo un volumen de 150 kg. El suelo se llevó al vivero de las UNAS, se secó bajo sombra, una vez seco el suelo se tamizó con la finalidad de eliminar cualquier residuo solado.

3.2.3.2. Selección del material orgánico

El estiércol de vacuno y gallinaza, se obtuvo de la granja de Zootecnia de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), se recolectó aproximadamente 50 kg, luego se trasladó al vivero de la Facultad de Agronomía - UNAS, se secó y tamizó. Posteriormente se realizó el análisis en laboratorio de suelos de la facultad de agronomía.

3.2.3.3. Cálculo e incubación de cadmio

La cantidad de Cd necesario para el trabajo de investigación fue de 500 ml a una concentración de 1000 ppm. Los cálculos se muestran en el Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de la cantidad de sulfato de cadmio que se pesará para preparar una concentración de 1000 ppm de cadmio

Cálculo de sulfato de cadmio	
Cd	3CdSO ₄ 8H ₂ O
3 Cd	3CdSO ₄ 8H ₂ O
337,2 mg Cd	769.54 mg CdSO ₄ 8H ₂ O
1000 mg Cd	2.2820 g CdSO ₄ 8H ₂ O/l

De manera que 2,2820 g Cd SO₄8H₂O, se disolvió en 1 L de agua destilada. Una vez preparada la solución se procedió a hacer los cálculos para contaminar cada bolsa con 10 ppm de Cd, los cálculos se muestran en el Tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de la solución de cadmio para adicionar al suelo

Cadmio adicionado al suelo	
$W \text{ solución} * C \text{ solución}$	$W \text{ suelo} * C \text{ suelo}$
$W \text{ solución} * 1\ 000 \text{ mg Cd}$	$1\ 500 \text{ g suelo} * 10 \text{ mg Cd}$
$W \text{ solución}$	15 ml

Se determinó el porcentaje de humedad a capacidad de campo (28,34), y la necesidad de agua es 425 ml. En una probeta se midió el agua descontando los 15 ml de la solución y se adicionó a cada bolsa, se dejó 45 días en incubación.

3.2.3.4. Mezcla de material orgánico y llenado de bolsas

Después de 45 días de haberse dejado en reposo el suelo con Cd, se mezcló el material orgánico en proporciones de 1,5; 3 y 4,5 % de MO, como el análisis inicial presenta un porcentaje de 2,56 %, es decir las dosis de MO será 4,06; 5,56 y 7,06 % para tratamientos T₂, T₃ y T₄ el mismo proceso se realizó como Gallinaza. Una vez obtenido la mezcla se procedió a llenar las 48 bolsas de 1,5 kg; se presionó con las manos, quedando compactadas y rígidas, luego se acomodaron en el vivero de acuerdo al orden de los tratamientos, quedando la mezcla en reposo por 30 días, en el Tabla 8 se muestran las determinaciones cuantitativas de cada material orgánico.

Tabla 8. Cálculo del contenido de materia orgánica

Material orgánico			
% MO de Estiércol de vacuno = 65,94		% MO de Gallinaza = 69,81	
1,5 % MO	100 g	1,5 % MO	100 g
X % MO	1 500 g	X % MO	1 500 g
X	22,50 %	X	22,50 %
100 g	65,94 % MO	100 g	69,81 % MO
X g	22,5 % MO	X g	22,5 % MO
X	34 g	X	32 g
1,5 % MO	34 g de estiércol de vacuno	1,5 % MO	32 g de Gallinaza
3,0 % MO	68 g de estiércol de vacuno	3,0 % MO	64 g de Gallinaza
4,5 % MO	102 g de estiércol de vacuno	4,5 % MO	96 g de Gallinaza

3.2.3.5. Obtención y pre germinado de la semilla

Las semillas fueron obtenidas de frutos de cacao grandes, sanos y maduros, que fueron seleccionados en la parcela de un socio de la Cooperativa Agroindustrial Cacao Alto Huallaga en Tingo María. Estos frutos se tomaron del tercio superior, el tronco y las ramas principales de las plantas. Durante la extracción de las semillas, se tuvo un cuidado especial para evitar dañarlas, seleccionando cuidadosamente los granos más gruesos, sanos y normales. Las semillas seleccionadas se sometieron a un proceso de pregerminado, donde se mezclaron con aserrín fino y se mantuvieron húmedos. Después de 5 días, aproximadamente el 90 % de las semillas ya habían germinado.

3.2.3.6. Siembra de las semillas

Una vez germinado las semillas, se escogió 48 semillas las cuales contaban con una buena radícula, posteriormente se colocó una semilla en cada bolsa perpendicularmente a una profundidad de 3 cm cubriéndose cada semilla con el mismo sustrato.

3.2.3.7. Riego de los plantones de cacao

Se realizó cada tres días, adicionando 50 ml de agua a cada bolsa, ya que la ejecución de la investigación, se realizó bajo sombra, promoviendo el buen desarrollo de las plantas de cacao. La radiación solar llegaba a las plantas en las mañanas y en las tardes.

3.2.4. Características evaluadas

3.2.4.1. Altura y diámetro de tallo de plantones

Se midió desde el nivel del sustrato hasta la parte apical de la planta, es decir, hasta el último brote del tallo, esta medida se realizó cada 30 días después de la siembra. Al mismo tiempo, también se midió el diámetro de tallo a 2 cm de la base del sustrato, se hicieron cuatro evaluaciones.

3.2.4.2. Peso fresco y seco de plantones

Al final del experimento se tomó los pesos frescos de tres plantas en una balanza digital. Posteriormente fueron llevadas a una estufa por tres días a 105 °C y luego se pesó la muestra seca.

3.2.4.3. Cadmio en suelo

Se analizó cadmio disponible. Para ello se pesó 6 g de suelo molido, secado bajo sombra, al aire libre y se adicionó 24 ml de Extractante EDTA 0,05 M pH 7, se agitó por 20 min, luego se filtró. La lectura del extracto se realizó en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica. Cadmio asociado a MO. Para ello se usó el sólido del análisis de Cd disponible, se adicionó 18 ml de hipoclorito de sodio al 6 % con pH 8,5; luego se colocó en baño maría por 30 min a 100 °C y se agitó cada 10 min. Luego se dejó enfriar, se filtró y el sustrato

se hizo lectura en Espectrofotómetro de Absorción Atómica (Martínez y Rivero 2005). Para análisis de cadmio total. Se usó el método 3050 de la USEPA (González, 2010).

3.2.4.4. Cambio en plantones de cacao

Para el análisis de cadmio en plantones de cacao, se usó el medio de digestión ácida (Ácido clorhídrico) multi-elemento, el extracto que fue leído en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (Zasoski y Burau, 2008).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros biométricos de plántones de cacao en vivero

4.1.1. Altura y diámetro de tallo

Los resultados del análisis de varianza realizado a los plántones de cacao en altura y diámetro por efecto de tres dosis de estiércol de vacuno y gallinaza (Tabla 9). Se observa diferencia estadística entre los tratamientos en estudio tanto en altura y diámetro del tallo de plántones de cacao, es decir que al menos un tratamiento en estudio es estadísticamente diferente, por lo tanto, hay inferencia entre los tratamientos a un nivel de confianza del 95 %. Los coeficientes de variación (CV) para altura y diámetro del tallo es 12,48 y 13,05 %, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] (2005) los valores del CV de altura y diámetro se califican como homogeneidad aceptable.

Tabla 9. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para la altura y diámetro de plántones de cacao

Fuente de variación	GL	Altura		Diámetro	
		CM	Sig.	CM	Sig.
Tratamientos	7	29,00	S	0,64	S
Error experimental	16	7,96		0,28	
Total	23				
CV (%)		12,37		13,05	

S = Significativo

Dado que se observaron diferencias estadísticas significativas en el análisis de varianza, se llevó a cabo un análisis de comparación múltiple utilizando la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$). El objetivo fue investigar en detalle las diferencias estadísticas entre los tratamientos analizados (Tabla 9). Para altura de plántones de cacao, se observa que el tratamiento T₂ (10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno) se sitúa en el primer lugar y distinguiéndose estadísticamente de los tratamientos en estudio, con una altura promedio de 28,60 cm, la altura de los demás tratamientos es estadísticamente igual, siendo el tratamiento T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza) con menor altura de plantas. Respecto al diámetro de tallo de plántones de cacao, se observa a los tratamientos T₁ y T₀, situados en el primer lugar con diámetro promedio de 4,76 y 4,65 mm, distinguiéndose estadísticamente de los tratamientos, T₆ (10 ppm Cd + 64 g Gallinaza), T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza), T₃ (10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno) y T₄ (10 ppm Cd + 120 g Estiércol de vacuno), estadísticamente son igual con valores promedios de 3,66; 3,66 y 3,56 mm. Los tratamientos T₂ (10 ppm de Cd + 34 g

Estiércol de vacuno), T₅ (10 ppm Cd + 32 g Gallinaza) y T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza) estadísticamente son igual, alcanzaron diámetro de 4,47; 4,03 y 3,88 mm.

Tabla 10. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para la altura y diámetro de plántones de cacao.

Tratamientos	Altura		Tratamientos	Diámetro	
	cm	Sig.		mm	Sig.
T ₂	28,60	a	T ₁	4,75	a
T ₁	24,10	b	T ₀	4,58	a
T ₀	23,90	b	T ₂	4,47	a b
T ₅	22,63	b	T ₅	4,03	a b
T ₃	22,43	b	T ₇	3,88	a b
T ₄	20,87	b	T ₆	3,66	b
T ₆	20,17	b	T ₃	3,66	b
T ₇	18,27	b	T ₄	3,56	b

Tratamientos unidos por la misma letra en columna no existe significación estadística.

Leyendo:

T₀: Testigo absoluto

T₂: 10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno

T₃: 10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno

T₄: 10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno

T₁: 10 ppm Cd

T₅: 10 ppm Cd + 32 g Gallinaza

T₆: 10 ppm Cd + 64 g Gallinaza

T₇: 10 ppm Cd + 96 g Gallinaza

Los resultados muestran que a mayores dosis de enmiendas orgánicas, los plántones de cacao obtuvieron menor altura y diámetro, se debe posiblemente a que las enmiendas acumulaban demasiada humedad y además altas concentraciones de sales, por efecto de la misma composición de las enmiendas orgánicas, estas diferencias de altura es más notoria en la enmienda de gallinaza, que además muestra menor altura y diámetro de plántones de cacao (Figura 2a y 2b), demostrando así que no hay un efecto positivo entre los dos tipos de enmiendas, Merino (2013) manifiesta que la aplicación de abonos orgánicos en dosis mayores a los 300 g, presentan problemas de lento crecimiento y no hay desarrollo de raíces; por lo tanto, la altura de plántones está en función a las dosis usadas de estiércol de vacuno y gallinaza, significa que a mayor dosis de enmiendas orgánicas menor altura de plántones de cacao. Los resultados muestran que la altura y diámetro de tallo de plántones de cacao a dosis de 68, 102, 64 y 96 g correspondiente a estiércol de vacuno y gallinaza, los plántones de cacao muestran menor altura y diámetro, a diferencia cuando la dosis fue 34 y 32 g, los plántones de cacao alcanzan mayores diámetros. Lo que significa, que para la producción de plántones de cacao no necesita niveles altos de MO; según los resultados del presente trabajo, puesto que los tratamientos con alto contenido de MO, probablemente haya mucha humedad en el sustrato de las bolsas y por consecuencia una deficiencia nutricional, porque no hay descomposición ni mineralización del material orgánico, más bien pudrición, afectando las raíces, que cuando se les reviso mostraban necrosamiento, secado y caída de hojas de los plántones de cacao, por lo que se debe aplicar un máximo de 2 % de MO (Tabla 8). Según Orozco y Thienhaus (1997),

manifiestan, que el uso adecuado de MO es muy favorable para la producción de plántones de cacao, también, Paredes (2003) manifiesta que la MO es uno de los elementos que favorece la nutrición del suelo, con Ca, Mg y K. Por su parte Martínez (2004); como se citó en Sajami (2013), muestra que los abonos orgánicos, activan e incrementan los microorganismos benéficos del suelo, facilitando la absorción mineral, vitaminas, aminoácidos, ácidos orgánicos, Vásquez (2008), señala que el compost, el té de estiércol y el biol tienen densidades microbianas de 11,750 UFC/g, 5,667 UFC/g y 5,333 UFC/g, mientras que el bocashi cuenta con una densidad de 32,000 UFC/g. Por lo tanto, es plausible que el uso de estos materiales orgánicos en cantidades adecuadas (34 y 32 g) pueda resultar beneficioso para los plántones de cacao, lo que se refleja en los resultados más favorables observados.

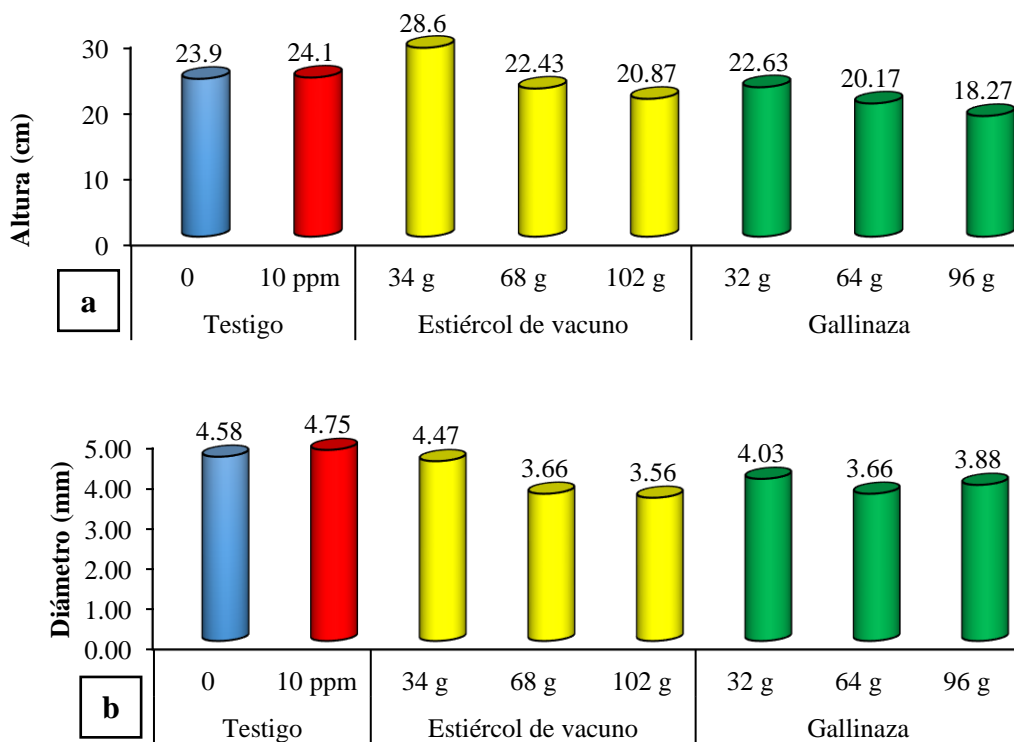


Figura 2. Desarrollo de plántones de cacao por efecto de dos enmiendas y tres dosis: a altura (cm); b diámetro (mm)

Por otro lado, Tuesta et al. (2016) manifiestan que el pH del suelo influye en el crecimiento de altura de plántones de cacao (Tabla 3) se determinó pH diferentes y tiene relación con el crecimiento en altura de plántones de cacao. El experimento mostro mayor altura y diámetro de plántones de cacao en estiércol de vacuno es probable debido a que en las enmiendas estiércol de vacuno muestra mayor contenido de Ca, Mg y K (Tabla 2), lo que las plantas estarían aprovechando estos nutrientes para su desarrollo, Moreno et al. (2008),

manifiestan que la aplicación de estiércol animal mejora el crecimiento de los cultivos vegetales. Las enmiendas orgánicas tienen la propiedad de retener agua, pero además oxigenan el suelo para un mejor desarrollo de raíz por ende mejor desarrollo de plantas; caso contrario sucede cuando la dosis de enmienda orgánica es alta y en bolsas al parecer hay un desbalance de aireación, exceso de humedad del suelo asociado las partículas del suelo, sucede una mala oxigenación para la respiración de las raíces, proceso muy necesario para el crecimiento de una planta.

4.1.2. Peso fresco y seco de los plántones de cacao

Los resultados del análisis de varianza para peso fresco y seco de plántones de cacao (Tabla 11), se observa diferencias estadísticas significancia para peso fresco y seco de plántones de cacao, es decir que al menos un tratamiento en estudio tiene inferencia en los resultados. Los coeficientes de variación (CV) es 13,77 y 33,66 %, según DANE (2005) manifiestan que cuando el CV es menor de 14 % significa que existe una precisión aceptable en la toma de datos y cuando es mayor del 20 % indica que la estimación es poco precisa, tomando en cuenta la referencia, el peso fresco se considera precisión, a diferencia de peso seco se observa un alto CV es decir hay mayor variabilidad.

Tabla 11. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para la peso fresco y seco de plántones de cacao.

Fuente de variación	GL	Peso fresco		Peso seco	
		CM	Sig.	CM	Sig.
Tratamientos	7	4,88	S	4,88	S
Error experimental	16	0,75		0,75	
Total	23				
CV (%)		13,77		33,66	

S = Significativo

Al existir diferencias estadísticas en peso fresco y seco de plántones de cacao, se realizó el análisis de comparación múltiple a través de la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$), con la finalidad de profundizar las diferencias estadísticas respecto a los tratamientos en estudio (Tabla 12) En el análisis de comparación múltiple se observa que, los tratamientos T₀ (Testigo absuelto), T₁ (10 ppm Cd) y T₂ (10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno), son estadísticamente diferentes a los tratamientos T₅ (10 ppm Cd + 32 g Gallinaza), T₆ (10 ppm Cd + 64 g Gallinaza),

T₄ (10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno), T₃ (10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno), T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza), tanto para peso fresco y seco.

Tabla 12. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para peso fresco y seco de plantones de cacao a los 120 días después de la siembra en vivero

Peso fresco			Peso seco		
Clave	g	Sig.	Clave	g	Sig.
T ₀	8,10	a	T ₀	4,38	a
T ₁	7,73	a	T ₁	4,01	a
T ₂	7,36	a	T ₂	3,64	a
T ₅	6,38	b	T ₅	2,66	b
T ₆	5,38	b	T ₆	1,66	b
T ₄	5,25	b	T ₄	1,53	b
T ₃	5,20	b	T ₃	1,48	b
T ₇	4,97	b	T ₇	1,25	b

Tratamientos unidos por la misma letra en columna no existe significación estadística.

Leyendo:

T₀: Testigo absoluto

T₂: 10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno

T₃: 10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno

T₄: 10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno)

T₁: 10 ppm Cd

T₅: 10 ppm Cd + 32 g Gallinaza

T₆: 10 ppm Cd + 64 g Gallinaza

T₇: 10 ppm Cd + 96 g Gallinaza

Los tratamientos con 68, 102, 64 y 96 g de estiércol de vacuno y gallinaza, respectivamente, tienen efecto negativo sobre las variables peso fresco y seco de los plantones de cacao, por presentar menos peso (Figura 3a; 3b), esto se relaciona con el menor tamaño de plantones de cacao. Por lo que el peso de los plantones está en relación con la altura y diámetros de tallo de plantones de cacao, quiere decir que a mayor altura y diámetro mayor peso fresco y seco. Según Ouma (2006); como se citó en Gutiérrez et al. (2011), manifiesta que, en plantas de cítricos, presenta una relación entre, altura y diámetro de la planta con el peso fresco y seco de manera que mayor crecimiento de plantas, mayor contenido de líquido (Sabia) y por ende las plantas pesan más. De manera general analizando las medidas como altura, diámetro, peso fresco y seco de plantones de cacao, a mayor dosis de enmiendas orgánicas, los plantones de cacao obtuvieron menores medidas, esto significa que hay un efecto negativo para los plantones de cacao, según los datos de nuestro experimento. Datos que coinciden con lo reportado por Sajame (2013), los plantones de cacao cuando reciben una adecuada dosis de MO, incrementan el tamaño de plantones de cacao en vivero. Así mismo esto se evidencia en otro autor, Borjas (2008), quién manifiesta, que el uso de abonos orgánicos tiene un efecto favorable sobre el crecimiento longitudinal de las plantas de café. Por otro lado, Businelli et al. (1990); como se citó en Borjas (2008), manifiesta que la MO, aumenta el peso y altura de la planta, de maíz. Las

referencias es que a nivel de vivero las plantas de cacao no necesitan alto contenido de enmiendas orgánicas.

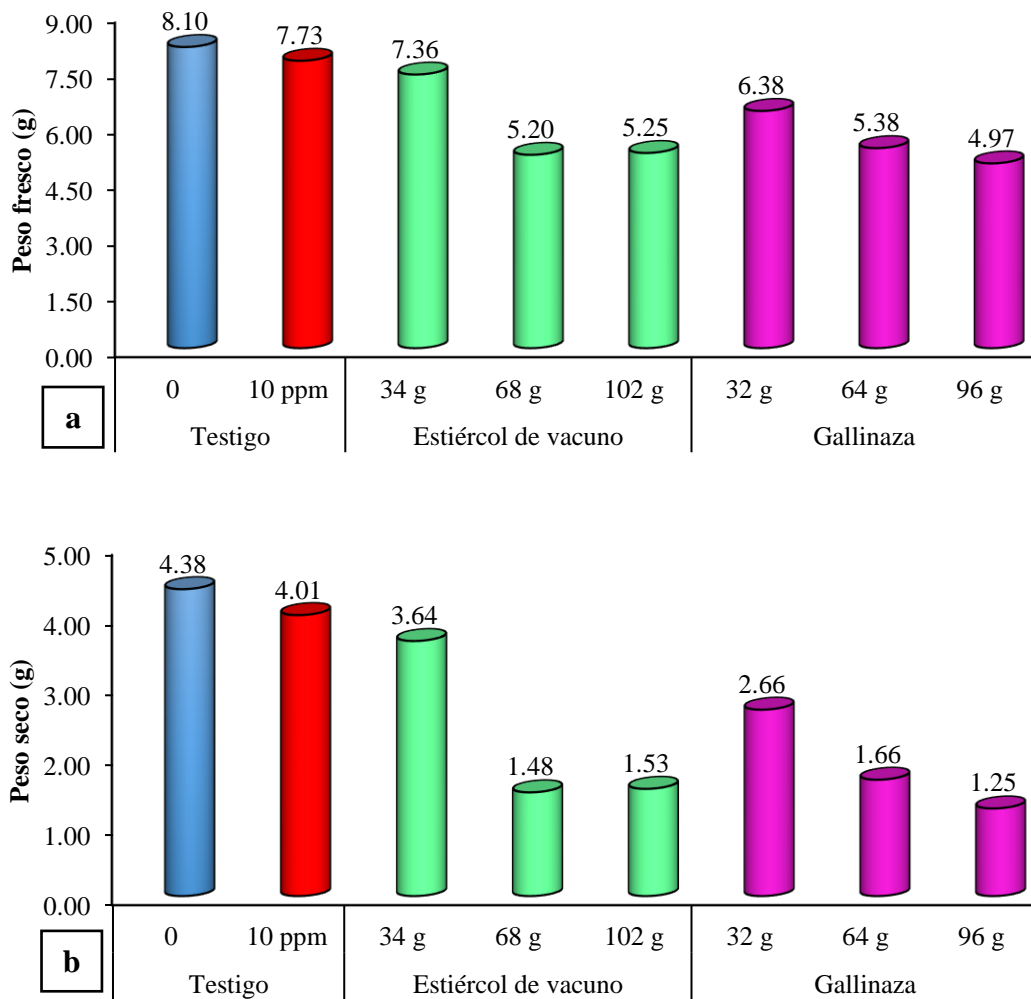


Figura 3. Peso de plántones de cacao por efecto de dos enmiendas y tres dosis: a peso fresco; b peso seco

4.2. Cadmio en el suelo y plántones de cacao

4.2.1. Cadmio disponible, asociado a materia orgánica y total

Los resultados del análisis de varianza, respecto al contenido de cadmio en suelo (disponible, asociado a M. O y total) en función a tres dosis de estiércol de vacuno y gallinaza (Tabla 13). Se observa diferencia estadística altamente significativas entre los tratamientos en estudio tanto para Cd disponible, Cd asociado a MO, y cadmio total, es decir, que al menos un tratamiento en estudio es estadísticamente diferente, por lo tanto, hay inferencia entre los tratamientos a un nivel de confianza del 95 %. Los coeficientes de variación (CV) es 5,34; 9,75

y 0,45 %, según el DANE (2008), si el CV es menor al 7 %, la variación del experimento es preciso. Es decir, la toma de muestras y el análisis de cadmio en suelo muestran buena homogenización.

Tabla 13. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para cadmio disponible, asociado a materia orgánica y total.

Fuente de variación	GL	Cd disponible		Cd asociado MO		Cd total	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
Tratamientos	7	10,12	s	0,10	s	7,48	s
Error	16	0,12		0,01		0,01	
Total	23						
CV (%)		5,34		9,75		0,45	

S = Significativo

Ante la existencia de diferencias estadísticas del análisis de varianza, se realizó el análisis de comparación múltiple a través de la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$), con la finalidad de profundizar las diferencias estadísticas respecto a los tratamientos en estudio (Tabla 14). Para Cd disponible en suelo, se observa, que los tratamientos T₅ (10 ppm Cd + 32 g Gallinaza) y T₂ (10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno) son estadísticamente iguales, pero diferentes a los demás tratamientos, además se obtuvo los mayores valores de Cd disponible en suelo con valores promedios de 8,21 y 7,88 ppm, asimismo, los tratamientos T₆ (10 ppm Cd + 64 g Gallinaza), T₃ (10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno), T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza) y T₄ (10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno) son estadísticamente iguales, con valores promedios de 7,24; 7,16; 6,85 y 6,45 ppm de Cd, pero diferentes a los tratamientos T₁ y T₀ que demás muestra menor contenido de Cd disponible en suelo. (Figura 4a), se observa que, cuando se aplicó enmiendas orgánicas (estiércol de vacuno y gallinaza) incrementa el contenido de Cd en suelo, en comparación con los tratamientos testigo; el análisis realizado a estas enmiendas (Tabla 2) muestra contenidos de Cd de 5,77 y 14,10 ppm, siendo mayor contenido de Cd en enmienda gallinaza, cabe ser que el valor que estén por encima de lo permitido, siendo muy probable que estos contenidos de Cd en las enmiendas estén incrementado el contenido por el alto contenido de Cd en el sustrato (Tabla 4). La aplicación de las enmiendas orgánicas incremento el contenido de Cd en los sustratos, comparándose con los tratamientos testigos, los valores promedios de 2,41 y 5,52 ppm de Cd, valores que son menores a los tratamientos con aplicación de enmiendas orgánicas, asimismo, se observa que tanto la dosis menor de estiércol

de vacuno y gallinaza obtuvieron los mayores valores de Cd promedios 8,21 y 7,88 ppm, correspondiente a los tratamientos de T₅ y T₂ que a su vez son iguales estadísticamente

Tabla 14. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para cadmio disponible, asociado a materia orgánica y total en suelos.

Trat.	Cd disponible		Trat.	Cd asociado MO		Trat.	Cd total	
	ppm	Sig.		ppm	Sig.		ppm	Sig.
T ₅	8,21	a	T ₇	4,75	a	T ₅	9,09	a
T ₂	7,88	a	T ₆	4,58	b	T ₂	9,04	a
T ₆	7,24	b	T ₄	4,47	c	T ₆	8,33	b
T ₃	7,16	b	T ₃	4,03	d	T ₃	7,79	c
T ₇	6,85	b	T ₅	3,88	e	T ₇	7,73	c
T ₄	6,45	b	T ₂	3,66	e	T ₄	7,58	d
T ₁	5,52	c	T ₁	3,66	f	T ₁	6,34	e
T ₀	2,41	d	T ₀	3,56	f	T ₀	4,28	f

Tratamientos unidos por la misma letra en columna no existe significación estadística.

Leyendo:

T₀: Testigo absoluto

T₂: 10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno

T₃: 10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno

T₄: 10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno

T₁: 10 ppm Cd

T₅: 10 ppm Cd + 32 g Gallinaza

T₆: 10 ppm Cd + 64 g Gallinaza

T₇: 10 ppm Cd + 96 g Gallinaza

Asimismo González (2009), manifiesta que muchos de los metales, como el Cd, provienen de la ganadería, es probable que el incremento de Cd estaría obedeciendo al uso de estiércol de vacuno, también Rodríguez et al. (2012), manifiesta que los abonos orgánicos como la gallinaza y los compost de diversos materiales, son materiales comúnmente utilizados para elevar la fertilidad de los suelos y mejorar los rendimientos agrícolas, pero estos productos también tienen metales pesados que son incorporados al suelo, la referencia confirma el incremento de Cd, en los tratamientos. También se observa que a mayor dosis de enmiendas el contenido de Cd disponible en suelo disminuye, según Correa (2018), menciona que la aplicación de enmiendas orgánicas es otra estrategia de remediación que implica la adición de nutrientes al suelo para mejorar sus características físicas y químicas; esto se logra principalmente mediante la aportación de MO, que posee propiedades quelantes, estas propiedades de la MO contribuyen a inmovilizar el cadmio (Cd), reduciendo así su absorción por las plantas. Por consiguiente, se sugiere que a medida que se aumenta la cantidad de MO incorporado al suelo, se fortalecen las propiedades quelantes del suelo, lo que resulta en una disminución de la disponibilidad de Cd en el mismo, asimismo Félix et al. (2008) manifiestan que el uso de enmiendas orgánicas, disminuyen la disponibilidad de Cd, basado en las propiedades químicas que presentan estos tipos de enmiendas.

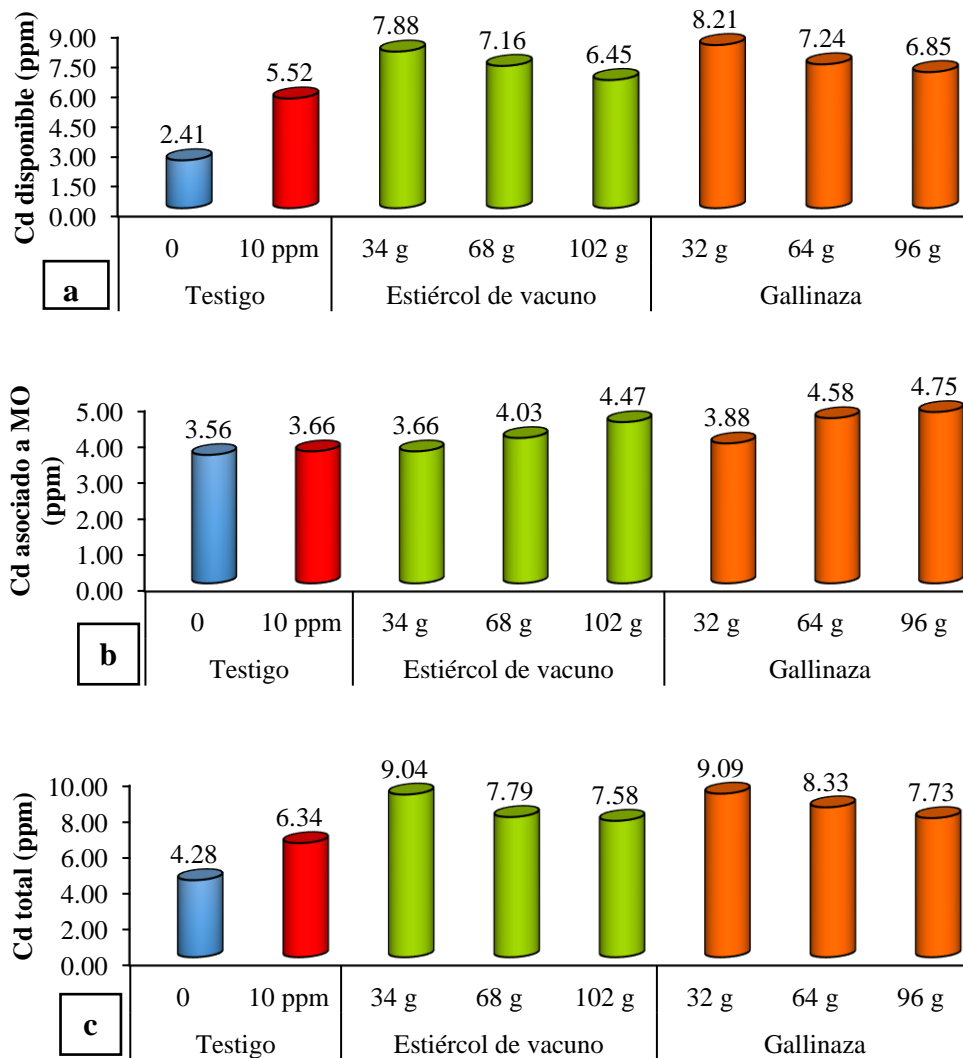


Figura 4. Contenido de cadmio en suelo por efecto de dos enmiendas y tres dosis: a cadmio disponible; b cadmio asociado a materia orgánica; c cadmio total.

Respecto al contenido de Cd asociado a MO, se observa, el tratamiento T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza), es estadísticamente diferente a los demás tratamientos, con un valor promedio de 4,75 ppm, asimismo, se observa que los tratamientos T₆ (10 ppm Cd + 64 g Gallinaza), T₄ (10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno) y T₃ (10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno), así mismo se observa a los tratamientos T₅ (10 ppm Cd + 32 g Gallinaza) y T₂ (10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno) son estadísticamente iguales y diferentes al tratamiento T₁ (10 ppm Cd) y T₀ (Testigo absoluto) que además son iguales estadísticamente y menor contenido de Cd asociado a MO, es probable, ya que estos tratamientos no se aplicó enmiendas, confirmando que cuando se aplicó enmiendas orgánicas al suelo, incrementa el porcentaje de MO y por ende la MO asocia al Cd en sus componentes. Los resultados también indican que

las dosis altas de estiércol de vacuno y gallinaza, asocian mayor Cd, es decir, hay un efecto positivo en dosis de enmiendas (Figura 4b), según Atsdr (2012); como se citó en Sánchez (2016), menciona que el Cd tiende a formar enlaces fuertes con la MOS, y esta fijación de Cd es más pronunciada en suelos con mayores concentraciones de MO (como se muestra en la Tabla 2); también se destaca que la energía de enlace entre el Cd y la MO es superior a la que se observa en la unión del Cd con las arcillas, de la misma manera, Lama (1995); como se citó en Huaynates (2013), indica que la MO tiene la capacidad de adsorber metales, como Cd, de tal manera que estos metales pueden quedar en una forma que no está disponible para ser absorbida por las plantas; también, Adriano (2001); como se citó en Abanto (2016), menciona que la MO tiene la capacidad de retener metales, ya sea mediante su habilidad para el intercambio catiónico o a través de su capacidad para formar complejos quelantes con estos metales, igualmente McLean y Bledsoe (1992); como se citó en Abanto (2016), indica que los componentes de la MO ofrecen lugares de unión para la adsorción de metales, incluyendo grupos funcionales con propiedades ácidas como carboxilos, fenoles, alcoholes, enoles y grupos amino, teniendo en cuenta las referencias mencionadas, coinciden con los resultados del experimento, ya que, los tratamientos donde se aplicó enmiendas orgánicas, se observa mayor Cd asociado.

Respecto al Cd total en suelo, se observa que los tratamientos T₅ (10 ppm Cd + 32 Gallinaza) y T₂ (10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno), son estadísticamente iguales con valores promedios de 9,09 y 9,04 ppm de Cd y diferentes a los demás tratamientos, que además son diferentes estadísticamente entre sí, asimismo, se observa que el menor contenido de Cd representa al tratamiento T₀ (testigo absoluto), (Figura 4c), lo más resaltante es que, que el contenido de Cd disponible en suelo, respecto al tratamiento testigo absoluto, es el 56,31% del Cd total, al incorporar enmiendas al suelo y estas contienen Cd el cadmio total en el suelo incrementa.

4.2.2. Cadmio en plantones de cacao

El análisis de varianza correspondiente al contenido de Cd en plantones de cacao por efecto de dos tipos de enmiendas (Estiércol de vacuna y Gallinaza) con tres dosis, evaluados a los 120 días después de la instalación (Tabla 23), se observa significancia estadística entre tratamientos y una variación de 11,49 %, datos considerados como buena homogeneidad. Ante la existencia de significancia en el análisis de varianza, fue necesario realizar el análisis de comparación de medias, a través de la prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) con la finalidad de conocer las diferencias existentes entre los tratamientos en estudio.

Tabla 15. Análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para cadmio en plantones de cacao

Fuente de variación	GL	SC	CM	F _{cal}	F _{tab} ($\alpha=0,05$)	Sig.
Tratamientos	7	7034,60	1004,94	172,67	0,0001	S
Error experimental	16	93,12	5,82			
Total	23	7127,73				
CV (%)	11,49					

S = Significativo

El análisis de Duncan se presenta en el Tabla 16. Donde se observa que los tratamientos T₇ (10 ppm Cd + 96 g Gallinaza), T₄ (10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno) y T₃ (10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno) son estadísticamente iguales, pero diferentes a los demás tratamientos con valores de 2,25; 4,60 y 7,46 ppm de Cd respectivamente. También, se observa que los tratamientos T₆, T₂, T₀, T₅ y T₁ son estadísticamente diferentes entre sí, asimismo, se observa al tratamiento T₁ (10 ppm Cd) representando el mayor contenido de en plantones de cacao. Los tratamientos con enmienda orgánica (Estiércol de vacuno y Gallinaza) muestran menores contenidos de Cd en los plantones de cacao, comparado con el tratamiento donde no se aplicó dichas enmiendas.

Tabla 16. Prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) para cadmio en plantones de cacao

Tratamientos	ppm	Sig.
T ₇ = 10 ppm Cd+ 96 g Gallinaza	2,25	a
T ₄ = 10 ppm Cd + 102 g Estiércol de vacuno	4,60	a
T ₃ = 10 ppm Cd + 68 g Estiércol de vacuno	7,46	a
T ₆ = 10 ppm Cd + 64 g Gallinaza	11,58	b
T ₂ = 10 ppm Cd + 34 g Estiércol de vacuno	18,00	c
T ₀ = Testigo absoluto	30,76	d
T ₅ = 10 ppm Cd + 32 g Gallinaza	42,92	e
T ₁ = 10 ppm Cd	50,45	f

Tratamientos unidos por la misma letra en columna no existe significación estadística.

Se determinó que a mayor dosis de enmiendas, menor contenido de Cd en los plantones de cacao, lo que significa que las enmiendas orgánicas tienen un efecto positivo respecto a la disponibilidad de Cd y por ende a la absorción de Cd por las plantas, confirmando la importancia de la MO en la retención de Cd (Figura 5), es decir, que el alto porcentaje de MO disminuye la absorción de Cd para las plantas, según Riveros (2007), la MO modifica la biodisponibilidad de los metales pesados por lo tanto disminuye la concentración en las plantas, por su parte Prieto et al. (2009), manifiesta que el Cd se asocia con la MO disminuyendo su disponibilidad para las plantas, mientras que los AF (ácidos fenólicos) movilizan el metal por fenómenos de complejación y solubilización. Es posible que este fenómeno este pasando en

nuestros resultados, los cuales observamos que a mayor porcentaje de MO menor Cd en plántones de cacao.

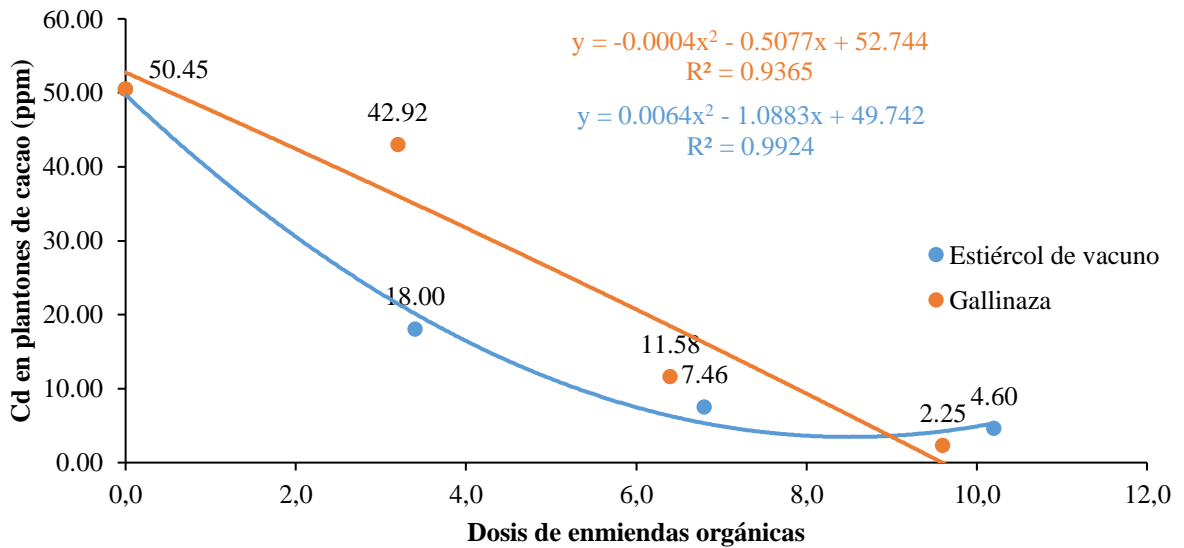


Figura 5. Curva de regresión polinómica entre el porcentaje de materia orgánica con cadmio en plántones de cacao

Se verificó una diferencia de 48,2 y 45,85 ppm de Cd entre los tratamientos con mayor contenido de estiércol de vacuno y gallinaza (Figura 6); que además la enmienda gallinaza con 96 g/planta muestra menor contenido de Cd. Además, se observa que, cuando se aplica gallinaza, retiene en mayor proporción el Cd que cuando se usa estiércol de vacuno; los cuales hacen pensar que dependerá del origen de la enmienda.

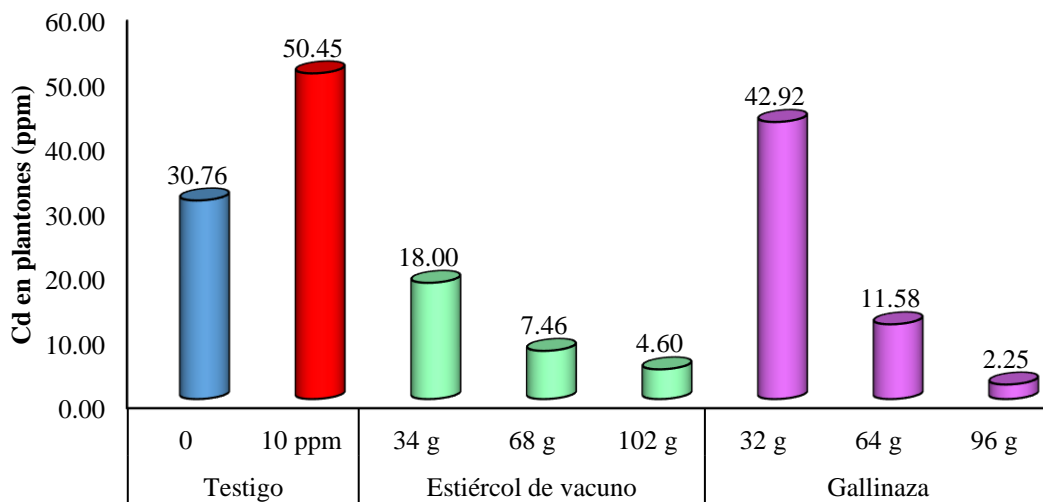


Figura 6. Cadmio en plántones de cacao por efecto de dos enmiendas y tres dosis

Las altas concentraciones de Cd en plantones de cacao, estaría obedeciendo a la disponibilidad de Cd en el suelo y uno de los factores que induce a la movilidad de Cd es el pH, cuando este, es ácido, datos que coincide con lo que manifiesta Bravo et al. (2014), donde determino que el pH tiene una función muy importante en la movilización de Cd. En el análisis final del sustrato (Tabla 3), se observa pH ácidos en los tratamientos testigos, que además son los tratamientos donde se muestra mayor Cd en los plantones de cacao, es probable que ocurra por efecto de la alta movilidad de Cd en el suelo, asimismo Sauve et al. (2000); como se citó en Prieto et al. (2009) manifiesta que el pH contribuye fuertemente a la disponibilidad de Cd en el suelo. Por su parte Contreras et al. (2011) y Alloway (2013); como se citó en Rodríguez (2017) manifiestan que un incremento de pH en el suelo el Cd se precipita como carbonato disminuyendo la absorción por las plantas, en tanto pH mayor a 7 el cadmio se inmoviliza debido a la formación de carbonatos de Cd (CdCO_3). Revisión bibliográfica que coincide con los resultados del trabajo toda vez que se observa que el pH de los sustratos donde se incorporó mayores dosis de materiales orgánicos incremento el pH mostrando una disminución de Cd total en plantas de cacao. según Rodríguez et al. (2008), afirman que la capacidad de la planta para acceder al Cd en el suelo está influenciada por múltiples elementos físicos, químicos y biológicos que afectan tanto la solubilidad del metal como su forma en el suelo. Entre estos factores, el pH del suelo se destaca como uno de los más significativos. Coincide con lo referido por Sánchez (2016) quien manifiesta que la dinámica del Cd está fuertemente afectada por el pH.

4.3. Correlación de Pearson entre cadmio en plantones de cacao con cadmio asociado a materia orgánico, disponible y total

Los análisis de correlación de Pearson entre Cd en plantones de cacao con Cd asociado a la MO, disponible y total, se observa una correlación significativa negativa con Cd asociado con MO y correlación negativa no significativa con Cd disponible y total en suelo.

Tabla 17. Análisis de correlación de Pearson entre cadmio total en plantones de cacao con análisis de suelos.

	Cd asociado a MO	Cd disponible en suelo	Cd total en suelo
Cd Plantones de cacao	-0,731*	-0,243	-0,263

*Correlación significativa ($p = 0,05$) ** Correlación altamente significativa ($P = 0,01$)

Significa que cuando el contenido de MO incrementa, este se asocia al Cd y disminuye en los plantones de cacao, lo mismo sucede cuando el Cd disponible y total, Sánchez

(2016) refiere que la movilidad del Cd en el medio depende del contenido de MO, además de otros factores como el pH, el potencial rédox y la presencia de arcillas. Además, Sanchez (2011), manifiesta que el proceso de adsorción de Cd en los suelos está relacionado principalmente con el contenido de Ca.

El diagrama de dispersión y recta de regresión entre Cd en plántones de cacao con Cd asociado a MO, se muestra una regresión negativa entre el contenido de Cd en plántones de cacao con Cd asociado a la MO; es decir, mientras mayor sea la asociación de Cd con la MO menor contenido de Cd en plántones de cacao (Figura 7). Prieto et al. (2009), manifiestan que el Cd se asocia con la MO, también Bravo et al. (2014), menciona que la MO en su estado de humificación desempeña una función esencial en la captura del Cd estableciendo conexiones sólidas a través de sus componentes carboxílicos y fenólicos, esta MO humificada exhibe una capacidad de retención del Cd más significativa y una mayor fuerza de unión en comparación con otras fases de adsorción; por otro lado, los ácidos fenólicos (AF) participan en la movilización del metal mediante procesos de formación de complejos y aumento de su solubilidad. Es posible que este fenómeno este pasando en nuestros resultados, los cuales observamos que a mayor contenido de MO menor Cd en plántones de cacao. Además, se observa que, cuando se aplica gallinaza, retiene en mayor proporción el Cd que cuando se usa estiércol de vacuno; los cuales hacen pensar que dependerá del material orgánico, para que la asociación de Cd con MO sea mayor.

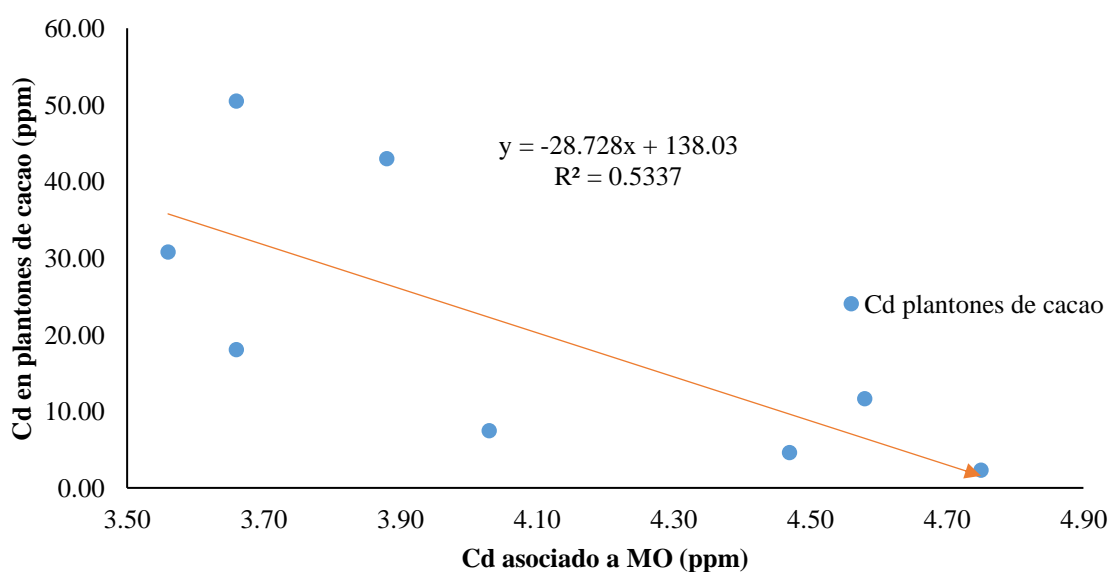


Figura 7. Diagrama de dispersión entre cadmio en plántones de cacao con cadmio asociado a materia orgánica

Bravo et al. (2014), En su estudio sobre el impacto de la calidad de la MO relacionado con las prácticas de uso y manejo del suelo en la retención de Cd, se observó que la cantidad de Cd unida a la MO fue notablemente inferior en el suelo utilizado para la agricultura en comparación con los suelos forestales. Además, manifiesta que el pH también tiene una función muy importante en la movilización de Cd como se observa en el Tabla 3, al usar gallinaza y estiércol de vacuno, el pH se hace alcalino; motivo por el cual los metales pesados desempeñan un papel significativo en la contaminación ambiental, y la cantidad de metales disponibles en el suelo depende del pH, la proporción de arcilla, el contenido de MO y la CIC manifiesta Sauve et al. (2000), como se citó en Prieto et al. (2009). En general mientras mayor sea el contenido de Cd en el suelo, mayor será el contenido de Cd soluble y cambiante para las plantas. Díaz (2014), ha observado que, en suelos con una concentración igual de Cd, este metal es más soluble y presenta una mayor disponibilidad para ser absorbido por las plantas en suelos de textura arenosa en comparación con los suelos arcillosos. El contenido total de Cd en el suelo cultivado con papa fue más elevado debido a la aplicación de fertilizantes fosfatados, que pueden contener hasta 15,3 ppm de Cd, como se señala en el estudio de Bastidas y Muñoz (2009). Una porción del Cd aplicada en este suelo se convierte en Cd residual, lo que a su vez aumenta la cantidad de Cd intercambiable en el suelo.

V. CONCLUSIONES

1. La utilización de enmiendas orgánicas como el estiércol de vacuno y la gallinaza aumentó la disponibilidad de sitios de intercambio en el suelo. No obstante, se observará que a medida que se incrementaba la cantidad de estas enmiendas orgánicas, también se incrementaba la cantidad de Cd unido a la MO del suelo. Por esta razón, se registró una menor concentración de Cd en los plántones de cacao en los tratamientos T₇ y T₄.
2. La influencia de las enmiendas orgánicas (Estiércol de vacuno y Gallinaza) en el crecimiento de plántones de cacao fue negativo, debido que, a mayor dosis, se obtuvo menor altura, menor diámetro de tallo, peso fresco y seco, presentando problemas de secado del borde de las hojas y en algunas plantas hasta la caída.
3. Se observó que las enmiendas orgánicas (Estiércol de vacuno y gallinaza) incrementan el contenido de Cd disponible en suelo, sin embargo, a mayor dosis de enmiendas orgánicas, mayor Cd asociado a la MO; en cuanto al contenido de Cd en plántones de cacao, se determinó efecto positivo, debido que en las dosis de 96 g y 102 g de gallinaza y estiércol de vacuno se verificó menor Cd.
4. Se verificó correlación negativa, en donde fue significativo Cd asociado a MO y los que no presentaron significancia fueron Cd disponible y Cd total.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

De acuerdo con los resultados se hacen las siguientes recomendaciones

1. Realizar trabajos de investigación más profundos en diferentes fuentes de materiales orgánicos.
2. Realizar trabajos de investigación comparando diferentes tipos de suelos según su clase textural.
3. Realizar análisis de Cd soluble, Cd cambiante, con trabajos de incubación de Cd.

VII. REFERENCIAS

- Abanto, M. A. (2016). *Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional UNALM. <http://Repositorio institucional.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/1949/F04-A23-T.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Acosta, M. M. (2007). *Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del valle del Mezquital*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Repositorio institucional UAEH. <http://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10993/Determinacion%20de%20metales%20pesados%20suelos%20agricolas.pdf?sequence=1>
- Andrade, M y Martínez, L. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. 3^{ra} ed. volumen digital. <https://publicaciones.unirioja.es/catalogo/monografias/mdaa03.shtml>
- Arteaga, B., León, S y Amador, C. (2003). Efecto de la mezcla de sustratos y fertilización sobre el crecimiento de *Pinus Durangensis* M. en vivero. Xalapa, México. *Foresta Veracruzana* 5(2), 9-15. <http://www.redalyc.org/pdf/497/49750202.pdf>
- Arvelo, M. Á., González, D., Maroto, S., Delgado, T y Montoya, P. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao: Prácticas latinoamericanas/Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*. <https://Repositorio institucional.iica.int/handle/11324/6181>
- Berríos, J. P. (2015). *Fuentes y niveles de materia orgánica en condiciones de invernadero*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional UNALM. <http://Repositorioinstitucional.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/1631/TESIS%20JUAN%20PABLO%20BERRIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bonilla, A. A (2021). *Técnicas de elaboración de los abonos orgánicos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Educación]. Repositorio institucional UNE. <https://Repositorioinstitucional.une.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14039/7463/MONOGRAF%C3%8DA%20-%20BONILLA%20ORTEGA%20ARASELI%20AMELIA%20-%20FAN.pdf?sequence=1>
- Bonomelli, C., Bonilla, C y Valenzuela, A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 38(10), 1179-1186. <https://www.scielo.br/j/pab/a/dBv7FZxQWJBM4MnpwtfSt8M/?format=pdf>

- Borjas, R. R. (2008). *Uso de fuentes naturales en la fertilización del café (Coffea arabica) var. Caturra en vivero como base para la producción orgánica en la selva central del Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional UNALM. <https://Repositorioinstitucional.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/1820/F04-B64-T.pdf?s equence=8>
- Bravo, I., Arboleda, C. A y Martín, 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 Agronomica* 63(2), 1-4. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169930904007>
- Correa, J. A. (2018). *Efecto de enmiendas cálcicas y orgánicas en la absorción de cadmio en plántones de cacao (Theobroma cacao L.) en la Región San Martín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto]. Repositorio institucional UNSM. <https://tesis.unsm.edu.pe/bitstream/11458/3237/1/AGRONOMIA%20-%20Juvicksa%20Amayda%20Correa%20Villacorta.pdf>
- Correndo, A y García, F. (2012). *Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos*. IPNI. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/2983F9B934DDE60D852579BA00747DF4/%24FILE/AA14.pdf>
- De La Peña, V. (2014). *Evaluación de la concentración de plomo y cadmio en suelo superficial de parques y plazas públicas, en tres municipios del área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio institucional UANL. <http://eprints.uanl.mx/4119/1/1080253816.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2008). *Estimación e interpretación del coeficiente de variación de la encuesta cocensal*. DANE. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/est_interp_coefvariacion.pdf
- Díaz, A. (2014). *Concentración de cadmio en sangre en una población laboral hospitalaria y su relación con factores asociados*. [Tesis de doctor, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio institucional UCM. <https://eprints.ucm.es/24537/1/T35084.pdf>
- Estrada, W. J. M., Romero, X. G y Moreno, J. A. (2011). *Guía técnica del cultivo de cacao manejado con técnicas agroecológicas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza e Confederación de Federaciones de la Reforma Agraria Salvadoreña. http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2015/12/Estrada_et_al_Guia_Tecnica_Cacao.pdf

- Félix, J. A., Sañudo, J. T., Rojo, G. E., Martínez, R y Olalde, V. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai*, 4(1), 57-67. <https://www.redalyc.org/pdf/461/46140104.pdf>
- Fernández, P. P. (2011). *Determinación de la fracción biodisponible de metales trazas (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en suelos tratados con biosólidos por medio de métodos biosimuladores validados a través de ensayos con plantas de maravilla*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional UCHILE. https://Repositorioinstitucional.uchile.cl/bitstream/handle/2250/105368/qffernandez_pp.pdf?sequence=3
- Florida, N., Paucar, H. J., Jacobo, S. S., Mamani, F y Torres, J. (2019). Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao. *Revista de investigaciones Altoandinas* 21(2), 264-273. http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v21n4/a04v_21n4.pdf
- González, C., Thompson, J., Martínez, Y y Sánchez, N. (2010). Concentración de cadmio en partículas de diferentes tamaños de un suelo de la Cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*. 25(2), 1-10. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652010000200008
- González, J. R. (2009). Metales pesados en carne y leche y certificación para la Unión Europea (UE). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 22(3), 1-15. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902009000300006
- Guerrero, J. (2012). *Guía técnica de análisis de suelo y fertilización de cacao*. UNALM y AGROBANCO. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/010-b-cacao.pdf>
- Gutiérrez, M., Gómez, R y Rodríguez, N. F. (2011). Comportamiento del crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.), en vivero, sembradas en diferentes volúmenes de sustrato. *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agorpecuaria*. 12(1), 33-41 <http://www.redalyc.org/pdf/4499/449945030004.pdf>
- Hernández, J. (2012). *Especiación de metales pesados contaminantes en los suelos y acuífero del Río de los Remedios*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional IPN http://www.Repositorio_institucionaldigital.ipn.mx/bitstream/123456789/16244/1/Tesis%2520Janette%2520IPN.pdf

- Hernández, J. M. (2016). *Estudio del cacao en el Perú y el mundo*. MINAGRI-DGPA-DEEIA. <https://bibliotecavirtual.midagri.gob.pe/index.php/analisis-economicos/estudios/2016-1/2-1-estudio-del-cacao-en-el-peru-y-en-el-mundo/file>
- Huauya, M. A y Huamaní, H. (2014). Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao, *Theobroma cacao* L. *The Biologist*. 12(1), 1-11. <https://revistas.unfv.edu.pe/rtb/article/view/385/337>
- Huaynates, J. L. (2013). *Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. https://Repositorioinstitucional.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/451/T_CSA-84.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Inés, O. (2011). *Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género Pelargonium: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad*. [Tesis de doctor, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio institucional UBA. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011orronodanielaines.pdf>
- López, M. (2011). *Biorremediación de metales pesados con aislados microbianos procedentes de procesos de compostaje*. [Tesis de maestría, universidad de Almería]. Repositorio institucional UAL. <http://Repositorioinstitucional.ual.es/bitstream/handle/10835/474/BIORREMEIACI%c3%93N%20DE%20METALES%20PESADOS%20CON%20AISLADOS%20MICROBIANOS%20PROCEDENTES%20DE%20PROCESOS%20DE%20COMPOSTAJE-L%c3%93PEZ%20MART%c3%8dN%2c%20MARIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mahecha, J. D., Trujillo, J. M y Torres, M. A. (2015) Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariara, departamento del Meta. *ORINOQUIA - Universidad de los Llanos - Villavicencio, Meta. Colombia*. 19(1), 1-5. <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v19n1/v19n1a11.pdf>
- Martínez, Y y Rivero, C. (2005). Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados en el suelo. *Ingeniería UC* 12(3), 14-20. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70712303.pdf>
- Mendoza, L. (2018). *El 93% de la producción peruana de cacao se concentra en 7 regiones*. Agencia Nacional de Noticias. APPC. <http://agraria.pe/noticias/el-93-de-la-produccion-peruana-de-cacao-se-concentra-en-7-re-16171>.
- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Gil-Rivero, A. E., 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.

- Merino, E. G. (2013). *Efecto de la aplicación de abonos procesados con microorganismos eficientes en la producción de plántulas de cacao (Theobroma cacao L.) clon CCN- 51*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://Repositorioinstitucional.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/161/AGR-604.pdf?sequence=1>
- Mite, F., Carrillo, M y Durango, W. (2010). *Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador*. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. <https://Repositorioinstitucional.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5872/4/iniapbeetpart1dnmsa.pdf>
- Munera, G. A y Meza, D. C (2012). *El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal*. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://Repositorioinstitucional.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/7377066a-bac4-4402-a306-eb45caa49d1c/content>.
- Ottos, E. (2018). *Fraccionamiento densimétrico y químico de la materia orgánica asociado al cadmio en suelo aluvial y residual cacaotero*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. https://Repositorioinstitucional.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1340/EOD_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R y Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia*. 33(2), 112-119. <http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v33n2/art07.pdf>
- Piedrahíta, O. (2009). *Acidez del suelo*. http://www.nuprec.com/Nuprec_Sp_archivos/Literatura/Acidez%20del%20Suelo/Fuentes%20y%20efectos.pdf
- Prieto, J., González, C., Román, A y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>
- Raraz, E. A. (2015). *Determinación química toxicológica de plomo y cadmio en agua para consumo humano proveniente de los reservorios de la zona de San Juan Pampa – distrito de Yanacancha – Pasco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional UNMSM. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4449/Raraz_pe.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reyes, M y Barreto, L. (2010). Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. *Revista Épsilon*, 16(1), 31-45. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1149&context=ep>

- Riveros, R. (2007). *Efecto de la materia orgánica soluble y coloidal de los biosólidos sobre la biodisponibilidad de Cu, Pb, Ni, Cd y los niveles de ácido ascórbico y glutatión en plantas*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional UCHILE. https://Repositorioinstitucional.uchile.cl/bitstream/handle/2250/105668/riveros_r.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Rodríguez, H. S. (2011). *Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UNAL http://bdigital.unal.edu.co/62280/352/10190_48469.2017.pdf
- Rodríguez, M.; Muñiz, O., Calero, B., Álvarez, M., Martínez, F., Limeres, T., Orphee, M y Aguilar, A. M. (2012). Contenido de metales pesados en abonos orgánicos, sustratos y plantas *Cultivos Tropicales*, 33(2), 5-12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193223812001>
- Rodríguez, S., Martínez, N., Romero, P y Sandalio, L. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas* 17(3),139-146. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8734/1/ECO_17%283%29_14.pdf
- Román, P.; Martínez, M y Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce De León, J y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Facultad de Agronomía. Uruguay. <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
- Sadeghian, S. (2012). *Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (Coffea arabica L.) en la etapa de almácigo*. Colombia. [Tesis de doctor, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UNC. <https://Repositorioinstitucional.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8983/16077856.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sadeghian, S. (2016). *La acidez del suelo una limitante común para la producción de café*. CENICAFE. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/704/1/avt0466.pdf>
- Sajami, C. (2013). *Determinación de la influencia de seis concentraciones de biofermentos en el crecimiento de plantones de cacao (Theobroma cacao L.) en la fase de vivero*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional

- UNAS. <http://Repositorioinstitucional.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/166/AGR610.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Sales, B. (2006). *Caracterización de la materia orgánica de suelos representativos de ecosistemas amazónicos del Perú, departamento de Ucayali, e influencia de su uso y manejo en el secuestro del carbono*. [Tesis de doctor, Universidad de Sevilla]. Repositorio institucional institucional. <https://core.ac.uk/download/pdf/36094475.pdf>
- Sánchez, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio*. [Tesis de maestría, Universidad Complutense]. Repositorio institucional institucional. [https://eprints.ucm.es/id/eprint/49137/1/CARMEN%20CORREA%20GARCIA%20\(1\).pdf](https://eprints.ucm.es/id/eprint/49137/1/CARMEN%20CORREA%20GARCIA%20(1).pdf)
- Tantalean, E., Huauya, M. (2017). *Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. http://Repositorioinstitucional.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1242/TPE_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tuesta, A. L., Trigozo, E., Cayotopa, J. J., Arévalo, E., Arévalo, C. O., Zúñiga, L. B y Leon, B. (2016). Optimización de la fertilización orgánica e inorgánica del cacao (*Theobroma cacao* L.) con la inclusión de *Trichoderma* endófito y Micorrizas arbusculares. *Tecnología en Marcha*, 30(1), 1-14. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v30n1/0379-3982-tem-30-01-67.pdf>
- Vásquez, D. (2008). *Producción y evaluación de cuatro tipos de abono como alternativa biotecnológica de uso de residuos orgánicos para la fertilización de pastos*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chorrillos]. Repositorio institucional ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1503/1/17T0873.pdf>.

ANEXOS

Tabla 18. Evaluaciones de altura y diámetro de plantones de cacao

Tratamientos		Altura			Diámetro		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
30 días	T1	16,60	12,80	19,60	1,74	1,55	2,53
	T2	14,30	17,80	15,60	1,98	2,61	2,03
	T3	21,10	15,30	16,10	2,90	1,86	2,33
	T4	14,10	16,70	12,60	1,22	1,39	1,86
	T5	13,70	12,10	12,60	1,25	1,05	2,14
	T6	13,30	8,60	11,30	0,81	1,66	1,53
	T7	15,90	12,40	11,10	1,96	2,05	1,01
	T8	8,10	11,10	10,60	1,91	1,66	1,25
60 días	T1	20,20	16,40	23,20	2,56	2,37	3,35
	T2	17,90	21,40	19,20	2,80	3,43	2,85
	T3	24,70	18,90	19,70	3,72	2,68	3,15
	T4	17,70	20,30	16,20	2,04	2,21	2,68
	T5	17,30	15,70	16,20	2,07	1,87	2,96
	T6	16,90	12,20	14,90	1,63	2,48	2,35
	T7	19,50	16,00	14,70	2,78	2,87	1,83
	T8	11,70	14,70	14,20	2,73	2,48	2,07
90 días	T1	22,50	18,70	25,50	3,49	3,30	4,28
	T2	20,20	23,70	21,50	3,73	4,36	3,78
	T3	27,00	21,20	22,00	4,65	3,61	4,08
	T4	20,00	22,60	18,50	2,97	3,14	3,61
	T5	19,60	18,00	18,50	3,00	2,80	3,89
	T6	19,20	14,50	17,20	2,56	3,41	3,28
	T7	21,80	18,30	17,00	3,71	3,80	2,76
	T8	14,00	17,00	16,50	3,66	3,41	3,00
120 días	T1	24,67	21,40	27,00	4,67	4,41	4,85
	T2	23,30	24,50	24,60	4,65	5,48	4,00
	T3	28,60	26,70	25,50	4,47	4,05	4,27
	T4	22,43	23,80	19,00	3,66	3,52	4,20
	T5	20,87	21,60	20,00	3,56	3,04	4,00
	T6	22,63	19,30	21,70	4,03	4,24	4,48
	T7	20,17	20,00	18,20	3,66	4,30	2,90
	T8	18,27	19,60	17,40	3,88	3,90	4,00

Tabla 19. Evaluación de peso fresco y seco de plantones de cacao

Tratamientos	PESO FRESCO			PESO SECO		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
T0	8,50	6,08	8,62	4,43	2,30	4,47
T1	8,12	8,04	8,15	3,35	4,15	4,16
T2	9,17	6,62	6,29	3,95	2,31	2,24
T3	5,68	4,75	5,17	1,85	1,10	1,74
T4	5,13	5,52	5,09	1,30	1,09	0,93
T5	6,20	6,34	6,59	1,96	1,47	2,23
T6	6,53	4,58	5,03	1,85	0,90	1,12
T7	5,24	5,08	4,58	1,47	0,70	0,87

Tabla 20. Análisis físico químico a sustratos

	Textura	pH	M.O	N	K	CIC	Ca	Mg	K	Na	K	Na
T0/R1	Franco limoso	4,80	1,46	0,07	165,93	3,64	3,24	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
T0/R2	Franco limoso	4,61	1,77	0,08	79,96	3,18	2,83	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00
T0/R3	Franco limoso	4,65	2,38	0,11	308,86	3,91	3,46	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
T1/R1	Franco	4,83	2,69	0,12	179,42	4,27	3,76	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00
T1/R2	Franco	4,46	1,69	0,08	358,84	2,99	2,63	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
T1/R3	Franco	4,63	2,30	0,10	358,84	3,61	3,14	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00
T2/R1	Franco	6,35	3,30	0,15	1989,13	7,22	4,94	1,45	0,44	0,39	0,44	0,39
T2/R2	Franco	6,50	3,53	0,16	2813,77	7,12	5,10	1,45	0,38	0,19	0,38	0,19
T2/R3	Franco	6,38	3,15	0,14	1974,13	6,33	4,42	1,30	0,38	0,23	0,38	0,23
T3/R1	Franco	6,88	4,22	0,19	2274,00	8,43	5,65	2,14	0,45	0,19	0,45	0,19
T3/R2	Franco	7,01	4,38	0,20	2862,74	8,23	5,08	2,00	0,89	0,26	0,89	0,26
T3/R3	Franco	6,82	3,91	0,18	2308,99	7,74	5,11	1,92	0,55	0,16	0,55	0,16
T4/R1	Franco	7,14	4,61	0,21	3918,28	10,02	5,75	2,56	1,29	0,42	1,29	0,42
T4/R2	Franco	7,10	4,30	0,19	4113,20	8,56	5,27	2,28	0,82	0,19	0,82	0,19
T4/R3	Franco	7,06	4,38	0,20	3158,61	9,55	5,25	2,31	1,59	0,40	1,59	0,40
T5/R1	Franco	6,51	2,84	0,13	849,63	6,28	4,75	1,13	0,27	0,13	0,27	0,13
T5/R2	Franco	6,46	3,38	0,15	109,95	8,71	6,47	1,65	0,42	0,17	0,42	0,17
T5/R3	Franco	6,24	3,65	0,17	164,93	6,85	5,13	1,08	0,44	0,20	0,44	0,20
T6/R1	Franco	6,97	3,45	0,16	1954,14	6,35	4,30	1,20	0,63	0,22	0,63	0,22
T6/R2	Franco	7,25	4,53	0,20	2728,80	8,03	5,10	1,85	0,87	0,21	0,87	0,21
T6/R3	Franco	7,20	3,91	0,18	1849,19	7,04	4,87	1,30	0,69	0,18	0,69	0,18
T7/R1	Franco	7,43	4,38	0,20	2713,81	7,67	4,51	1,72	1,16	0,28	1,16	0,28
T7/R2	Franco	7,10	5,22	0,23	2313,99	7,11	4,94	1,46	0,56	0,15	0,56	0,15
T7/R3	Franco	6,38	4,61	0,21	2908,72	6,58	4,02	1,27	1,09	0,20	1,09	0,20

Tabla 21. Análisis químico de contenido de cadmio

Tratamiento/repetición	Cd Disponible	Cd total	Cd -plantas	
R1	T0	2,60	4,30	28,57
	T1	5,68	6,30	50,59
	T2	7,96	9,00	20,38
	T3	7,24	7,78	6,08
	T4	6,60	7,55	4,75
	T5	7,88	9,08	44,59
	T6	7,28	8,35	10,92
	T7	6,52	7,75	2,35
R2	T0	2,60	4,25	37,15
	T1	5,68	6,38	52,76
	T2	7,96	9,08	16,31
	T3	7,24	7,83	8,84
	T4	6,60	7,60	4,31
	T5	7,88	9,05	42,17
	T6	7,28	8,33	12,54
	T7	6,52	7,73	2,16
R3	T0	2,04	4,28	26,56
	T1	5,20	6,33	48,02
	T2	7,72	9,05	17,32
	T3	7,00	7,75	7,46
	T4	6,16	7,58	4,73
	T5	8,88	9,13	42,01
	T6	7,16	8,30	11,28
	T7	7,52	7,70	2,25

**Figura 8.** Llenado de bolsas y ordenado por tratamientos



Figura 9. Selección de semillas con mejor radícula



Figura 10. Desarrollo de plantones de cacao



Figura 11. Incorporación de agua a plántones de cacao



Figura 12. Evaluaciones de altura y diámetro