

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



**EFFECTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS LÍQUIDAS EN LA REDUCCIÓN DEL
CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES DE *Theobroma cacao* (CACAO) EN EL
DISTRITO DE ALEXANDER VON HUMBOLDT**

Tesis

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

**PRESENTADO POR:
MARY BEDOYA GERONIMO**

**ASESORES:
JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO**

Tingo María – Perú

2024



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 DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN y AYACUCHO"**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

N° 022-2024-FA-UNAS

BACHILLER : MARY BEDOYA GERONIMO

TÍTULO : "EFECTO DE ENMIENDAS ORGANICAS LIQUIDAS EN LA
REDUCCIÓN DEL CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES
DE *Theobroma cacao* (CACAO) EN EL DISTRITO DE
ALEXANDER VON HUMBOLDT"

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Ing. M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL : Dr. VICTORINO RIVAS PULACHE
VOCAL : Ing. M.Sc. LUIS GERMAN MANSILLA MINAYA

ASESOR : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 04/12/2024

HORA DE SUSTENTACIÓN : 10:05 A.M.

LUGAR DE SUSTENTACIÓN : SALA AUDIVISUAL DE LA F.A

CALIFICATIVO : BUENO

RESULTADO : APROBADO

OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 04 DE DICIEMBRE DEL 2024


M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
PRESIDENTE


Dr. VICTORINO RIVAS PULACHE
VOCAL


M.Sc. LUIS GERMAN MANSILLA MINAYA
VOCAL


Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
ASESOR



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 219 - 2025 - 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 Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS LÍQUIDAS EN LA REDUCCIÓN DEL CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES DE Theobroma cacao (CACAO) EN EL DISTRITO DE ALEXANDER VON HUMBOLDT	MARY BEDOYA GERONIMO	15 % Quince

Tingo María, 07 de julio de 2025


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

Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE

C.C. Archivo

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



**EFFECTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS LÍQUIDAS EN LA REDUCCIÓN DEL
CADMIO EN EL SUELO Y PLANTONES DE *Theobroma cacao* (CACAO) EN EL
DISTRITO DE ALEXANDER VON HUMBOLDT**

Autor	: Bach. Mary Bedoya Geronimo
Asesores	: Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano
Área de investigación	: Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelo
Línea de investigación	: Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelo
Eje temático	: Enmiendas orgánicas líquidas en cadmio, en plantones de cacao
Lugar de ejecución	: Caserío Corazón de Jesús, distrito Alexander Von Humboldt, provincia Padre Abad, región Ucayali
Duración del trabajo	: 7 meses
Financiamiento	: S/ 4 691,10

Tingo María – Perú. Abril, 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
VICERRECTOR DE INVESTIGACION
Instituto de Investigación
Unidad de Gestión de la Investigación

**FORMATO PARA REGISTRAR LA TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
UNIVERSITARIO**

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva

Facultad : Agronomía

Escuela profesional : Agronomía

Departamento académico : Ciencias agrarias

Título de Tesis : Efecto de enmiendas orgánicas líquidas en la reducción del cadmio en el suelo y plántones de *Theobroma cacao* (cacao) en el distrito de Alexander Von Humboldt

Objetivo general : Evaluar el efecto de dos enmiendas orgánicas líquidas en la reducción de cadmio en el suelo y en plántones de *Theobroma cacao* (cacao), en el distrito de Alexander Von Humboldt.

Autor de la tesis : Bach. Mary Bedoya Geronimo

DNI : 70502335

Correo electrónico : bedoyageronimo05@gmail.com

Asesores : Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano

Área de Investigación : Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelo

Grupo de investigación : Recuperación y manejo de suelos degradados y contaminados - RYMSDYC

Línea de investigación : Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelo

Lugar de Ejecución : Caserío Corazón de Jesús, distrito Alexander Von Humboldt, provincia Padre Abad, región Ucayali

Fecha de inicio : Setiembre del 2021

Fecha de finalización : Marzo del 2022

Presupuesto : S/ 4 691,10

Financiamiento : Propio (x) FIF () Externo ()

Según: Resolución: N° 461-2023-R-UNAS y Resolución: N° 295-2023-R-UNAS

DEDICATORIA

A Dios celestial por permanecer constantemente en mi sendero, brindándome la oportunidad de alcanzar mi desarrollo profesional y acompañándome con su presencia en cada paso.

A mi querida madre Alicia Geronimo Morales, por su apoyo en todo mi proceso de formación académica; su esfuerzo y ejemplo han sido una fuente de inspiración, impulsando en mí el deseo de alcanzar mis metas.

A mis hermanos, Maribel, Elmer y Ezequiel, por sus consejos y todo el apoyo que me han brindado en mi proceso de formación académica.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todos sus miembros, agradezco su respaldo y confianza, especialmente a los profesores de la Facultad de Agronomía que desempeñaron un papel fundamental en mi formación profesional.
- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, quien actuó como asesor de esta tesis, por su colaboración en todas las etapas de la investigación, desde la elaboración hasta la culminación y revisión del trabajo académico y científico.
- Al Ing. Miguel Sánchez Rodríguez, quien actuó como segundo asesor de esta tesis, por su colaboración en la etapa de ejecución y orientación profesional, durante el desarrollo de la investigación.
- Al M. Sc. Jaime Chávez Matías, en su calidad de presidente, por sus valiosas observaciones y recomendaciones que fueron fundamentales para la mejora del informe.
- A los jurados, Dr. Victorino Rivas Pulache y M. Sc. Luis Germán Mansilla Minaya, por su invaluable contribución durante el desarrollo de esta investigación. Sus aportes y sugerencias fueron esenciales para alcanzar los objetivos planteados.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
ABSTRACT	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Generalidades del cultivo de cacao	3
2.1.1. Clon CCN-51	3
2.1.2. Clon CMP-15	3
2.2. Cadmio	5
2.2.1. En el suelo	5
2.2.1.1. Cadmio total.....	6
2.2.1.2. Cadmio disponible	8
2.2.2. En las plantas.....	9
2.3. Enmienda orgánica líquida.....	10
2.3.1. Avibiol.....	11
2.3.2. Monty's.....	12
2.4. Antecedentes del estudio.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1. Lugar de ejecución	16
3.2. Materiales y métodos	16
3.2.1. Materiales	16
3.2.2. Análisis inicial del suelo	17
3.2.3. Análisis de cadmio en almendras de cacao	18
3.2.4. Metodología	18
3.2.5. Tratamientos.....	18
3.2.5.1. Diseño experimental	19
3.2.5.2. Esquema del análisis de varianza.....	19
3.2.5.3. Características del campo experimental.....	20
3.2.5.4. Croquis	20
3.3. Conducción del experimento	21
3.3.1. Extracción de la tierra y preparación de sustrato	21
3.3.2. Llenado y acomodo de las bolsas.....	21
3.3.3. Incubación con sulfato de cadmio.....	22

3.3.4. Obtención y pre germinado de las semillas.....	22
3.3.5. Siembra de las semillas en las bolsas	22
3.3.6. Aplicación de las enmiendas orgánicas Avibiol y Monty's	23
3.3.7. Labores culturales.	23
3.4. Variables evaluadas.....	23
3.4.1. Parámetros biométricos de los plántones de cacao	23
3.4.2. Análisis de cadmio	24
3.4.3. Análisis físico químico del sustrato	25
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. Parámetros biométricos de plántones de cacao.....	27
4.1.1. Altura.....	27
4.1.2. Diámetro.....	31
4.1.3. Número de hojas	36
4.1.4. Longitud y volumen de raíz	39
4.1.5. Peso de materia seca.....	46
4.2. Análisis de cadmio	49
4.2.1. Cadmio disponible en suelo	49
4.2.2. Cadmio en plántones de cacao	52
4.3. Análisis de sustratos.....	55
4.3.1. pH.....	57
4.3.2. Materia orgánica.....	59
4.3.3. Fósforo disponible.....	62
4.3.4. Potasio disponible	65
4.3.5. Calcio	67
4.3.6. Magnesio	70
V. CONCLUSIONES.....	73
VI. PROPUESTAS A FUTURO	74
VII. REFERENCIAS	75
ANEXO	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Composición mineral de Avibiol	12
2. Composición detallada de Monty's Liquid Carbon	13
3. Análisis inicial físico químico del suelo que se utilizó como sustrato.....	17
4. Análisis de cadmio a las semillas de cacao.	18
5. Descripción de los tratamientos en estudio	19
6. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para la altura de plántones de cacao, evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra.	27
7. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de la altura de cacao evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra.....	29
8. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para diámetro de plántones de cacao, evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra.	32
9. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de diámetro de cacao evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra.	33
10. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para número de hojas de plántones de cacao, evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra.....	36
11. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de número de hojas de cacao evaluado entre los 60 y 120 días después de la siembra.....	37
12. Cuadrado medio del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) de la longitud y volumen de raíz de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.	40
13. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del volumen de raíz de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra	42
14. Cuadrado medio del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) del porcentaje de materia seca de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.	46
15. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del porcentaje de materia seca de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.	47
16. Análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en el suelo de los sustratos evaluado a los 120 días de realizado el experimento.....	49
17. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en el suelo de los sustratos evaluado a los 120 días después de la siembra.....	50
18. Análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en plántones evaluado a los 120 días de realizado el experimento.	52
19. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.	53
20. Análisis físico químico del sustrato al final del experimento.	56
21. Primera y segunda evaluación de altura de plántones de cacao (30 y 60 días).	85

22.	Tercera y cuarta evaluación de altura de plántones de cacao (90 y 120 días).....	86
23.	Primera y segunda evaluación del diámetro de plántones de cacao (30 y 60 días).....	87
24.	Tercera y cuarta evaluación del diámetro de plántones de cacao (90 y 120 días).....	88
25.	Primera y segunda evaluación del número de hojas de plántones de cacao (30 y 60 días).	89
26.	Tercera y cuarta evaluación del número de hojas de plántones de cacao (90 y 120 días).....	90
27.	Evaluaciones de longitud y volumen de raíz, porcentaje de materia seca, cadmio en suelo y plántones.	91
28.	Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de longitud de raíz de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.	92
29.	Cálculo de la cantidad de sulfato de cadmio que se pesó para preparar una concentración de 1000 ppm de cadmio	92
30.	Cálculo de la solución de cadmio para adicionar al suelo	92
31.	Cálculo de la solución de las enmiendas orgánicas	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Imagen satelital del campo experimental "Fundo Doña Alicia" y ubicación del vivero, en el distrito Alexander Von Humboldt, Ucayali (Landsat 8).	16
2. Detalle de la unidad experimental.....	20
3. Croquis del campo experimental.....	21
4. Efecto de las dosis de enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's, en dosis de 0, 150 y 300 ml) en cada clon sobre la altura de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.....	30
5. Efecto de dosis de enmiendas (Avibiol y Monty's, en dosis de 0, 150 y 300 ml) en cada clon sobre el diámetro del tallo de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.....	34
6. Efecto de dosis de enmiendas (Avibiol y Monty's, en dosis de 0, 150 y 300 ml) en cada clon sobre en el número de hojas de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.	38
7. Impacto de las enmiendas (Avibiol y Monty's) y cadmio en la longitud de raíz de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.....	41
8. Efecto de las enmiendas (Avibiol y Monty's) en el volumen de raíz de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.	44
9. Efecto de las enmiendas (Avibiol y Monty's) y cadmio en la materia seca de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.	48
10. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) sobre la disponibilidad de cadmio en el sustrato para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.....	51
11. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) sobre el contenido de cadmio total en plántones de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.....	54
12. Variación del pH del suelo bajo la influencia de enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.	57
13. Efecto de las enmiendas (Avibiol y Monty's), en distintas dosis, sobre el contenido de materia orgánica del suelo en los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.....	60
14. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.....	63
15. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la disponibilidad de potasio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.....	66

16.	Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la concentración de calcio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.	68
17.	Influencia de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la concentración de magnesio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.	70
18.	Preparación del sustrato: a. Suelo tamizado, b. Llenado de bolsas, c. Peso de bolsas con suelo, d. Llenado de bolsas y ordenado según croquis, e. Incorporación de cadmio en las bolsas y f. Incubación de cadmio en bolsas llenadas con suelo.	93
19.	Preparación de las semillas: a. Selección de semillas, b. Semillas germinadas, c. Siembra de semillas en las bolsas, d. Tapado de las bolsas con semillas, e. Crecimiento de los plántones y f. Aplicación de enmiendas orgánicas.	94
20.	Evaluación y aplicación de enmiendas: a. Diámetro, b. Altura, c. Preparación de enmiendas y d. Aplicación de enmiendas.	95
21.	Muestras de suelo en laboratorio para su análisis: a. Secado de suelo y b. Molido de suelo.	95
22.	Algunos análisis en laboratorio: a. Lectura de pH, b. Aplicación de EDTA para cadmio disponible. c. Análisis de cadmio en plantas y d. Esclarecimiento de muestras de cadmio en plantas.	96
23.	Visita del jurado: a. En vivero y b. En gigantografía.	96
24.	Análisis de suelo final de caracterización.	97
25.	Análisis de suelo inicial, caracterización, cadmio disponible y total.	98
26.	Análisis de cadmio en las semillas de cacao.	99
27.	Análisis final de cadmio en los sustratos.	100
28.	Análisis de cadmio de los plántones de cacao, parte aérea.	101

RESUMEN

La investigación se realizó en el vivero del Fundo Doña Alicia, en el Caserío Corazón de Jesús, distrito Alexander Von Humboldt, provincia Padre Abad, región Ucayali. Los objetivos fueron evaluar el crecimiento de plantones de cacao en respuesta a las enmiendas orgánicas líquidas, evaluar el efecto en la reducción de niveles de cadmio en el suelo y plantones, y evaluar el efecto de las enmiendas en las propiedades químicas del suelo. Se aplicaron diversos tratamientos, involucrando dos clones de cacao (CCN-51 y CMP-15), dos enmiendas orgánicas líquidas (Avibiol y Monty's) y dos dosis (15 y 30 %) y 5 ppm de cadmio (sulfato de cadmio). También se utilizaron tratamientos de control sin enmiendas ni cadmio. El diseño estadístico fue completamente al azar con 12 tratamientos y 4 repeticiones. Los resultados indicaron que el clon CMP-15 con Avibiol y Monty's a 300 mL fue el tratamiento más eficaz para el crecimiento de plantones. Los tratamientos con 5 ppm de cadmio no afectaron negativamente el crecimiento. La aplicación de Avibiol y Monty's a 300 ml/L redujo eficazmente los niveles de cadmio en el suelo, destacando menor contenido en el clon CCN-51. Las enmiendas mostraron efectos significativos en propiedades del suelo, como cambios en el pH, disminución de materia orgánica con la aplicación de cadmio y respuestas específicas en la disponibilidad de fósforo, potasio, calcio y magnesio.

Palabras claves: Avibiol, Monty's, Clon CCN-51, Clon CMP-15 y disponibilidad de nutrientes

ABSTRACT

The research was carried out in the nursery of the Doña Alicia Farm, in the Corazón de Jesús Caserío, Alexander Von Humboldt district, Padre Abad province, Ucayali region. The objectives were to analyze the development of cocoa seedlings in response to liquid organic amendments, evaluate the impact on the reduction of cadmium levels in soil and seedlings, and study the effectiveness of the amendments on soil chemical characteristics. Various treatments were applied, involving cocoa clones, liquid organic amendments (Avibiol and Monty's) at different doses, and 5 ppm of cadmium. Control treatments without amendments or cadmium were used. The statistical design was completely randomized with 10 treatments and 4 repetitions. The results indicated that clone CMP-15 with Avibiol and Monty's at 300 mL was the most effective treatment for seedling growth. Treatments with 5 ppm cadmium did not negatively affect growth. The application of Avibiol and Monty's at 300 ml/L effectively reduced cadmium levels in the soil, highlighting a lower content in the CCN-51 clone. The amendments showed significant effects on soil properties, such as changes in pH, decrease in organic matter with the application of cadmium and specific responses in the availability of phosphorus, potassium, calcium and magnesium.

Keywords: Avibiol, Monty's, CCN-51 clone, CMP-15 clone, and nutrient availability.

I. INTRODUCCIÓN

La acumulación de cadmio en los suelos de cacao en Perú, particularmente en Ucayali, compromete la calidad del producto y dificulta su exportación a mercados como la Unión Europea. Las normativas alimentarias de la UE restringen los niveles de cadmio en productos de cacao, lo que ha impactado negativamente el comercio de cacao en grano y polvo peruanos (Fajardo y López, 2022). Estudios han detectado concentraciones de cadmio en suelos y granos de cacao que exceden los límites establecidos por la UE, afectando su comercialización (Florida, 2021). Además, en algunas regiones, los niveles en almendras de cacao superan los valores máximos permitidos, lo que agrava las dificultades de exportación (Florida et al., 2018). Esto plantea la necesidad de implementar estrategias innovadoras para reducir la acumulación de cadmio sin perjudicar la productividad del cultivo.

El presente estudio busca abordar esta problemática mediante la evaluación de la eficacia de enmiendas orgánicas líquidas, específicamente Avibiol y Monty's, en la reducción de los niveles de cadmio en el suelo y en los plántones de cacao (CCN-51 y CMP-15) a nivel de vivero. La investigación plantea la siguiente premisa: ¿Pueden las enmiendas orgánicas líquidas reducir eficazmente la concentración de cadmio en los suelos agrícolas y, al mismo tiempo, mejorar el crecimiento de los plántones de cacao? La necesidad de encontrar una solución viable y sostenible a este problema es crucial, no solo para mejorar la calidad del cacao producido en la región, sino también para garantizar la continuidad de este importante cultivo en los mercados internacionales.

Esta investigación es crucial por su impacto socioeconómico que, busca proteger los ingresos de los agricultores de Ucayali al ofrecer soluciones accesibles para reducir el cadmio en sus cultivos y mantener su competitividad global. Ambientalmente, aborda los efectos perjudiciales de los metales pesados en los suelos y el ecosistema agrícola, promoviendo prácticas sostenibles de descontaminación. Académicamente, ampliará el conocimiento sobre las interacciones entre enmiendas orgánicas y metales pesados, aportando bases científicas para futuros estudios.

El alcance de este estudio se extiende a los productores de cacao de la región de Ucayali, quienes serán los principales beneficiarios de los resultados obtenidos. Los hallazgos permitirán identificar prácticas agrícolas que no solo mejoren la calidad del suelo, sino que también incrementen la productividad de los cultivos de cacao. Además, la investigación podrá ser utilizada por entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales que trabajen en el desarrollo de políticas agrícolas sostenibles y en la implementación de programas de capacitación para agricultores. A nivel internacional, los resultados contribuirán a la mejora de la calidad del

cacao peruano, consolidando su posición en mercados extranjeros y reduciendo las barreras comerciales asociadas a la contaminación por cadmio.

La hipótesis que guía este estudio es que la aplicación de las enmiendas orgánicas líquidas Avibiol y Monty's reducirá significativamente los niveles de cadmio en el suelo y mejorará el desarrollo de los plántones de cacao (CCN-51 y CMP-15) en comparación con los suelos sin tratamiento, demostrando así su eficacia como una herramienta de manejo sostenible de suelos contaminados.

Objetivo general

Evaluar el efecto de dos enmiendas orgánicas líquidas en la reducción de cadmio en el suelo y en plántones de *Theobroma cacao* (cacao), en el distrito de Alexander Von Humboldt.

Objetivos específicos

1. Evaluar el crecimiento de los plántones de cacao (CCN-51 y CMP-15) a nivel de vivero en respuesta a la aplicación de enmiendas orgánicas líquidas.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas líquidas en la reducción de los niveles de cadmio en el suelo y plántones de cacao (CCN-51 y CMP-15)
3. Evaluar el efecto de las enmiendas líquidas en las propiedades químicas del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del cultivo de cacao

El cacao emerge como una planta de trascendencia histórica y cultural, desempeñando un papel central en las comunidades indígenas de América del Sur, su relevancia no solo se limita a la esfera alimentaria, cosmética y farmacéutica, sino que también se extiende a su consideración como un elemento sagrado en diversas culturas ancestrales; En Perú, la designación del cacao como Patrimonio Nacional en 2012 resalta su importancia cultural y económica, subrayando su arraigada herencia en la historia del país y su papel distintivo en la identidad nacional, además, la declaración del cacao como producto bandera en octubre de 2013 refuerza su contribución a la economía y a la presencia internacional de Perú. Desde una perspectiva científica, las investigaciones sobre el cacao abarcan disciplinas como la genética, la agronomía y la calidad del grano, con el objetivo de mejorar las variedades existentes y aumentar la productividad; la comprensión de la fisiología de la planta y la optimización de las condiciones de cultivo son cruciales para garantizar la calidad del cacao y su sostenibilidad a largo plazo, en este contexto, estudios como el presente experimento, que se centra en el impacto de enmiendas orgánicas y la presencia de cadmio en el suelo, pueden proporcionar información valiosa para la gestión y mejora de los cultivos de cacao (Barrueta, 2013).

2.1.1. Clon CCN-51

Las siglas CCN en "Colección Castro Naranjal" identifican a un cultivar de cacao cuyo fruto, de tonalidad roja, ha ganado reconocimiento por su elevado rendimiento (Gómez, 2017). Este híbrido forastero fue desarrollado en Ecuador, exhibe un promedio de 57 óvulos por ovario y presenta características como color rojo en estado inmaduro, forma oblonga, constricción basal ligera, grosor de cáscara intermedio, surcos profundos, 44 semillas por fruto, peso seco de la semilla de 1.4 g, índice de mazorca de 16, rendimiento de 2,760 kg/ha y un contenido de grasa del 54 %. En cuanto a su resistencia a enfermedades, se destaca su susceptibilidad a la pudrición parda, moderada resistencia a la escoba de bruja y moderada susceptibilidad a la moniliasis (García, 2010).

2.1.2. Clon CMP-15

Este clon adaptado al suelo tropical presenta una mazorca de color rojo en su etapa juvenil y rojo anaranjado al madurar, con un peso de semilla de 1,3 g, clasificándose como semilla mediana y disponible durante todo el año (Paredes, 2008). La forma de la semilla es elíptica a lo largo de su eje longitudinal y aplanada a lo largo del eje transversal, mientras que el fruto es considerablemente grande y ligeramente rugoso, se destaca por su alta resistencia

a enfermedades como la moniliasis, la escoba de bruja y la podredumbre parda, alcanzando rendimientos potenciales de hasta 3 000 kg/ha cuando se cultiva con alta densidad, según evidencia un estudio realizado en Tingo María; a pesar de sus cualidades agronómicas, este clon también se distingue por su agradable aroma (Paredes, 2014).

Las características aromáticas y gustativas de este clon se describen como afrutadas, florales, con matices a nueces y malta, el cacao fino de aroma se distingue por su sabor único, reconocido internacionalmente por su excepcional aroma y calidad, según la Organización Internacional del Cacao (ICCO), este tipo de cacao contribuye significativamente al 8 % de la producción mundial de chocolate, con países como Colombia, Ecuador, Venezuela y Perú responsables del 76 % de la producción global de cacao de excelente aroma (CASA LUKER, 2016).

Amores (2004) define la calidad como un atributo del producto que satisface las necesidades y deseos específicos de un segmento de mercado determinado. La calidad de un producto, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2000), abarca diversas facetas que influyen en cómo los consumidores perciben su valor monetario y su atractivo general. Graziani (2006), destaca que las necesidades de cada mercado y el uso previsto del producto son determinantes clave para la calidad del cacao. Los aspectos físicos de los granos, como su tamaño y presentación, junto con las características organolépticas de sabor y aroma, son fundamentales para garantizar la capacidad de procesamiento del cacao, siendo conocidos en conjunto como la calidad del grano (Cros et al., 1994).

Este clon se distingue por sus características aromáticas agradables y su sabor excepcional, lo que le confiere esta clasificación apreciada, especialmente en las mezclas de cacao; este tipo de cacao no sólo cumple con los criterios fundamentales de calidad, sino que también posee una destacada diversidad genética, contribuyendo así a la preservación de un valioso patrimonio histórico y cultural (García, 2010). La presencia del cacao aromático no solo contribuye a enriquecer el perfil de sabor del chocolate con matices únicos y variados, sino que también destaca su relevancia en la herencia cultural y la diversidad genética de esta planta emblemática (Loor-Solorzano et al., 2020).

Según Rodríguez et al. (2019), el cultivar VRAE-15, conocido también como CMP-15 en Huánuco y Ucayali, es genéticamente idéntico en todas sus variantes, lo que sugiere que las adaptaciones bajo diferentes nombres son copias del mismo cultivar. Este híbrido, derivado de los cultivares ICS-1 e IMC-67 y de los grupos Scavina y Huallaga-Satipo-

VRAE, muestra características productivas y sensoriales sobresalientes que han contribuido a su expansión en plantaciones a lo largo del país, incluyendo la región de Madre de Dios.

2.2. Cadmio

2.2.1. En el suelo

La presencia y movilidad del cadmio en el suelo están intrínsecamente ligadas a las características específicas del suelo y a la topografía del terreno, un estudio enfocado en la dinámica del cadmio en suelos destinados al cultivo de papa en Nariño, Colombia, concluyó que los mayores contenidos de cadmio intercambiable se encuentran en la capa superficial (0-13 cm), y más del 95 % de este metal pesado permanece en profundidades de 0-25 cm (Insuasty et al., 2006). El pH del suelo emerge como un factor crítico que determina la capacidad de amortiguación del suelo, destacándose que un pH de 7 actúa como umbral, donde por encima de este valor se amortigua eficientemente cualquier contaminación por cadmio. Por otro lado, la capacidad de amortiguación en suelos ácidos, por debajo de pH 7, es variable, siendo influenciada por la cantidad y naturaleza de los componentes edáficos (Isura, 2010). La disponibilidad del cadmio en los suelos, en comparación con otros metales, se caracteriza por ser generalmente alta, debido a su mayor solubilidad y a la prevalencia de uniones de baja energía con la fase sólida del suelo. Un análisis de la acumulación de metales, como cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo, en especies del género *Pelargonium* realizado por Inés (2011), señala que el cadmio se considera un elemento lábil y potencialmente biodisponible. Esta condición se atribuye a la alta saturación del metal y su baja asociación con los carbonatos en el suelo, lo que sugiere su disponibilidad para las plantas y, por ende, la importancia de comprender sus interacciones en estudios medioambientales.

La disponibilidad de cadmio en el suelo es un aspecto crucial en la comprensión de su comportamiento y riesgos ambientales, los estudios han demostrado que la movilidad y absorción de cadmio por las plantas dependen de factores como la textura del suelo, el pH, la materia orgánica y la presencia de otros elementos químicos. En cuanto a la textura del suelo, se ha observado que suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de cadmio en comparación con suelos arenosos (McBride, 1994), además, el pH del suelo juega un papel crucial, ya que el cadmio tiende a ser más móvil y disponible en suelos ácidos (pH bajo) (Alloway, 2013). La presencia de materia orgánica en el suelo puede influir en la disponibilidad de cadmio. La materia orgánica tiende a formar complejos con el cadmio, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad (Kabata-Pendias, 2011), es importante destacar que la contaminación del suelo con cadmio puede tener impactos significativos en la salud humana y el medio ambiente. La absorción de cadmio por las plantas cultivadas en suelos

contaminados puede llevar a la acumulación en la cadena alimentaria, lo que representa un riesgo para la salud humana (Alloway, 2013).

La exposición al cadmio puede tener diversas vías, abarcando desde la contaminación ambiental hasta la dieta diaria. A continuación, se proporciona información ampliada sobre las fuentes de exposición al cadmio:

1. Contaminación del suelo y agua: el cadmio puede ingresar al suelo y al agua a través de actividades industriales, como la minería, la metalurgia y la fabricación de baterías; la presencia de cadmio en el suelo y en cuerpos de agua puede aumentar la exposición a través de la cadena alimentaria (Klaassen et al., 1999).

2. Consumo de alimentos: la ingesta de alimentos contaminados es una fuente común de exposición al cadmio; las plantas, especialmente los vegetales de hojas verdes, pueden absorber cadmio del suelo, y los animales que consumen estas plantas también pueden acumularlo. El pescado de agua dulce, como los crustáceos y moluscos, puede contener niveles significativos de cadmio (Järup y Akesson, 2009).

3. Consumo de tabaco: el tabaco es una planta que tiene una afinidad particular por el cadmio; los fumadores pueden estar expuestos significativamente al cadmio a través del humo del tabaco y, como resultado, tienen niveles más altos de cadmio en su cuerpo en comparación con los no fumadores (Nawrot et al., 2006).

4. Emisiones atmosféricas: las emisiones industriales y la quema de combustibles fósiles también contribuyen a la presencia de cadmio en el aire; las partículas de cadmio pueden depositarse en el suelo y el agua, afectando así a los cultivos y los ecosistemas acuáticos (Klaassen et al., 1999).

5. Ocupacional: los trabajadores expuestos ocupacionalmente a actividades relacionadas con el cadmio, como la minería, la fundición y la fabricación de baterías, pueden enfrentar riesgos significativos de exposición (Järup y Akesson, 2009).

6. Productos de consumo: algunos productos de consumo, como ciertos juguetes y joyas, pueden contener cadmio; la exposición puede ocurrir a través del contacto directo con estos productos (Nordberg et al., 2018).

2.2.1.1. Cadmio total

Es una medida crucial para evaluar la contaminación ambiental y los riesgos para la salud pública; este metal pesado, generado principalmente por actividades industriales y agrícolas, puede acumularse en el suelo y ser absorbido por los cultivos, representando una amenaza para la seguridad alimentaria y la salud humana a través de la cadena alimentaria (FAO, 2018; USEPA, 2020). La presencia de cadmio en el suelo puede ser

el resultado de emisiones industriales, prácticas agrícolas como el uso de fertilizantes fosfatados contaminados, y la deposición atmosférica de residuos urbanos e industriales (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Estudios han demostrado que altas concentraciones de cadmio en el suelo pueden conducir a su acumulación en plantas comestibles, lo que representa un riesgo directo para la salud humana cuando se consumen estos cultivos contaminados (Alloway, 2013).

El cadmio es reconocido como un metal pesado con graves implicaciones ambientales y para la salud pública debido a su alta toxicidad y capacidad de acumulación en suelos y cultivos, la Directiva 86/278/EEC de la Unión Europea establece un límite máximo permisible de cadmio en suelos agrícolas de 3 mg/kg de suelo, diseñado para proteger la calidad del suelo y prevenir la contaminación de cultivos destinados al consumo humano, dado que el cadmio puede ser absorbido por las plantas y afectar la cadena alimentaria (European Commission, 1986).

Las principales fuentes de cadmio en el suelo incluyen emisiones industriales, el uso de fertilizantes fosfatados contaminados y la deposición atmosférica de residuos urbanos e industriales, estas actividades son responsables del incremento de los niveles de cadmio en el suelo, particularmente en áreas cercanas a zonas industriales o con prácticas agrícolas intensivas (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Los niveles de cadmio en el suelo son cruciales para identificar áreas contaminadas y aplicar medidas correctivas apropiadas, esto implica la implementación de prácticas de gestión de suelos y cultivos que reduzcan la acumulación de cadmio, además de la aplicación de técnicas de remediación en casos de contaminación existente. Es fundamental cumplir con los estándares y directrices establecidos por organismos reguladores como la Unión Europea para garantizar la seguridad alimentaria y proteger la salud pública frente a los efectos adversos del cadmio en el medio ambiente (European Commission, 2020).

Generalmente sólo una pequeña fracción del cadmio total presente en el suelo está disponible para ser absorbida por las plantas y, por lo tanto, representa un riesgo directo para la salud humana a través de la cadena alimentaria, este porcentaje puede variar considerablemente dependiendo de varios factores, como el pH del suelo, la presencia de materia orgánica, y las condiciones específicas de cada sitio (McLaughlin et al., 2011), por lo general, se estima que solo alrededor del 1-10 % del cadmio total en el suelo está en forma disponible, sin embargo, esta disponibilidad puede aumentar significativamente en suelos ácidos o en presencia de ciertos tipos de fertilizantes fosfatados, que pueden aumentar la solubilidad del cadmio y facilitar su absorción por las plantas (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007). Es importante tener en cuenta que la mayoría del cadmio presente en el suelo se

encuentra en formas menos disponibles o está ligado a componentes del suelo, como minerales y materia orgánica, lo cual reduce su movilidad y disponibilidad para las plantas y, por ende, para los organismos que dependen de los cultivos contaminados (Alloway, 2013). Estudios continuos sobre la dinámica del cadmio en el suelo y su disponibilidad son fundamentales para entender mejor los riesgos ambientales y para la salud asociados con este metal pesado y para desarrollar estrategias efectivas de gestión y remediación (European Commission, 2020).

2.2.1.2. Cadmio disponible

Se refiere a la fracción accesible para ser absorbida por plantas y otros organismos, en suelos ácidos, el cadmio es más soluble y, por tanto, más disponible, mientras que en suelos alcalinos tiende a precipitarse (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), la materia orgánica puede formar complejos con el cadmio, reduciendo su movilidad (McLaughlin, Parker, y Clarke, 1999), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo también juega un papel importante, ya que suelos con alta CIC pueden retener más cadmio en formas intercambiables (Alloway, 2013), la presencia de otros cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+} compite con el cadmio por los sitios de adsorción, afectando su disponibilidad (Smolders y Mertens, 2013). Además, la mineralogía del suelo, incluyendo arcillas y óxidos de hierro y manganeso, influye en la adsorción del cadmio, disminuyendo su movilidad (Sparks, 2003), las condiciones redox del suelo pueden provocar la precipitación del cadmio como sulfuro, reduciendo aún más su disponibilidad (Adriano, 2001).

Para evaluar la disponibilidad del cadmio en el suelo, se utilizan varios métodos complementarios que proporcionan diferentes perspectivas sobre la capacidad del metal para ser absorbido por las plantas, las extracciones químicas emplean soluciones como DTPA, EDTA y ácido acético para imitar las condiciones bajo las cuales el cadmio se encuentra disponible para las plantas, permitiendo cuantificar su concentración en la solución extraída (Alloway, 2013), estos métodos son útiles para caracterizar la fracción potencialmente biodisponible del cadmio en el suelo, implican la medición de la acumulación del metal en los tejidos vegetales, proporcionando una evaluación más realista de la biodisponibilidad del cadmio para las plantas (Kabata-Pendias, 2011).

La disponibilidad de cadmio en el suelo tiene un impacto significativo en las plantas, ya que pueden absorber este metal pesado y acumularlo tanto en partes comestibles como no comestibles, esto representa un riesgo directo para la salud humana y animal, dado que altos niveles de cadmio en los cultivos pueden resultar en la ingestión inadvertida de este metal tóxico, afecta negativamente a las plantas al inhibir su crecimiento, interferir con la fotosíntesis y alterar su metabolismo (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013).

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) (2005) establece límites de referencia para la concentración de cadmio en suelos, adaptados según el uso previsto del terreno y el nivel de riesgo de exposición, para la protección de la vida silvestre y los ecosistemas naturales, se recomienda un límite de 1 mg/kg de suelo, en áreas residenciales y de recreación, donde se espera una menor ingestión de suelo, el límite se reduce a 0,4 mg/kg, en cambio, en áreas agrícolas, donde existe un mayor riesgo de acumulación de cadmio en los cultivos y una posible exposición humana a través de la dieta, el límite es de 0,6 mg/kg.

2.2.2. En las plantas

La absorción de cadmio (Cd) por las raíces de las plantas es un proceso complejo que está influenciado por varios factores ambientales. La biodisponibilidad del Cd, su concentración en el suelo, la presencia de materia orgánica, el pH, el potencial redox, la temperatura y la concentración de otros elementos son determinantes clave en este proceso (Pernía et al., 2008). La capacidad de las células radiculares para secuestrar el metal desempeña un papel crucial en la posterior translocación del cadmio hacia la parte aérea de la planta. Otros factores relevantes incluyen la accesibilidad y movilización del metal capturado, la eficiencia del paso radial a través del simplasto y la endodermis, así como el flujo hacia la xilema (Rodríguez et al., 2008). El cadmio puede interferir en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales como calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P) y potasio (K), así como en el flujo de agua, generando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (Miranda et al., 2008). Asimismo, se ha observado que el cadmio induce modificaciones en la apertura estomática, la fotosíntesis y la transpiración de la planta (Rodríguez et al., 2008). Además, el Cd tiene la capacidad de sustituir al ion Mg en la molécula de clorofila, lo que resulta en la incapacidad de captar fotones, con la consiguiente disminución de la actividad fotosintética (Pernía et al., 2008). Este impacto multifacético del cadmio en los procesos fisiológicos de las plantas destaca la importancia de comprender sus efectos para implementar estrategias de gestión adecuadas en entornos contaminados con cadmio.

En las células vegetales, la absorción y transporte de cadmio (Cd) son mediados por proteínas específicas, entre las cuales se destacan el Transportador de Calcio LCT1 y la Proteína IRT1. Estas proteínas, inicialmente responsables de la absorción de calcio y hierro, respectivamente, pueden también facilitar la entrada de Cd en algunas plantas, regulando así su absorción y movilidad (Rodríguez et al., 2008). Una vez que el Cd entra en las células radiculares, tiende a acumularse principalmente en las raíces, ya que son las primeras en entrar en contacto con el Cd presente en el suelo. Este metal se secuestra en las vacuolas de

las células radicales, limitando su movilidad y toxicidad en la parte aérea de la planta, el Cd utiliza transportadores de otros metales como el calcio, hierro y zinc para penetrar en las células vegetales, compitiendo con estos cationes en la captura y transporte a través de la planta. Esta competencia puede generar desequilibrios nutricionales y afectar negativamente la absorción y transporte de metales esenciales, lo que impacta la salud de la planta (Pernía et al., 2008). Aunque el Cd se considera un elemento que puede translocarse fácilmente dentro de las plantas, su absorción y distribución varían entre especies. Diferentes plantas pueden seguir patrones específicos de acumulación y distribución de Cd, influenciados por factores genéticos, fisiológicos y ambientales. Por ejemplo, en el lino, la acumulación de Cd sigue un patrón diferente al del cáñamo, destacando la importancia de comprender estas variaciones inter-específicas (Inés, 2011). La absorción de Cd por las plantas es un proceso complejo y altamente dependiente de factores como la especie vegetal y las condiciones del suelo, este metal pesado tiende a acumularse en la capa superior del suelo, facilitando su disponibilidad para ser absorbido por las raíces de las plantas (González et al., 2010). La cantidad de Cd absorbido por las raíces está directamente relacionada con su concentración en el suelo (Pernía et al., 2008). En el cultivo de cacao, se han estudiado los niveles de Cd en diferentes órganos. Mite et al. (2010) encontraron concentraciones medias de Cd en cáscaras, hojas, almendras y cubiertas de cacao. Además, Tantalean y Huauya (2017) concluyeron que el tallo exhibe la concentración más alta de Cd, seguido por las hojas, raíces, almendras y cáscaras, lo que resalta la importancia de comprender la distribución de este metal en el cultivo de cacao.

2.3. Enmienda orgánica líquida

El uso de enmiendas orgánicas en la agricultura es universalmente reconocido por sus amplios beneficios. Sin embargo, existen limitados estudios que examinen de manera detallada los aspectos nutricionales y la actividad biológica asociada con estos fertilizantes orgánicos (Pérez, et al., 2008). Los microorganismos presentes en el suelo desempeñan un papel crucial en los ciclos de diversos nutrientes, especialmente en los procesos relacionados con el carbono, nitrógeno, azufre y fósforo. En el ciclo del carbono, su función es esencial para la descomposición de residuos orgánicos y la degradación de compuestos contaminantes, y se acepta comúnmente la utilización de biofertilizantes como enmiendas orgánicas para estimular la actividad microbiana en el suelo (Ros et al., 2010).

Las enmiendas orgánicas, aplicadas al suelo de manera continua durante tres años, contribuyen significativamente a la estabilidad de los agregados del suelo, reduciendo propiedades indeseables como la plasticidad, cohesión y pegajosidad asociadas a la arcilla, lo

que mejora su maleabilidad y aumenta su capacidad de retención hídrica (Brady & Weil, 1999). Asimismo, los ácidos húmicos presentes en estas enmiendas desempeñan un papel fundamental en la aceleración de la evaluación de minerales del suelo, promoviendo la liberación de cationes intercambiables esenciales. Este proceso, según Sánchez (2016), no solo incrementa la disponibilidad de nutrientes, sino que también fortalece la biología del suelo al proporcionar recursos alimenticios clave para los organismos que lo habitan.

2.3.1. Avibiol

Es un producto derivado de la fermentación anaeróbica del estiércol de gallinas ponedoras, cuya aplicación al suelo, en concentraciones de 200 ó 500 l/ha, resulta en una población microbiana significativa. Después de la aplicación, se registran densidades poblacionales de organismos como Actinomicetos, con $1,5 \times 10^4$ u.f.c./mL, bacterias totales con $3,8 \times 10^4$ u.f.c./mL y hongos con 3,3 propágulos/mL. Expresado a nivel de hectáreas, estas cifras se traducen en poblaciones aplicadas al campo de Actinomicetos de $3,0 \times 10^6$ /ha o $7,5 \times 10^6$ /ha, bacterias totales de $7,6 \times 10^9$ /ha o $1,9 \times 10^{10}$ /ha y hongos de $6,6 \times 10^5$ /ha o $1,7 \times 10^6$ /ha (Avibiol, 2017).

Resultados de ensayos realizados con Avibiol en diversos cultivos respaldan su capacidad para estimular significativamente el crecimiento radicular de las plantas. Este impacto se cuantifica de manera precisa mediante la colocación de cubos y se evalúa cualitativa y cuantitativamente mediante rizotrones. Además, se observa una influencia positiva en el peso de las raíces formadas entre dos plantas de vid, proporcionando una evaluación detallada del impacto de la enmienda orgánica Avibiol en el crecimiento radicular de la planta (Delgado, 2014). Estos hallazgos resaltan el potencial de Avibiol como una herramienta valiosa para mejorar la salud del suelo y fomentar el desarrollo óptimo de las plantas en diversas prácticas agrícolas.

El producto en cuestión presenta una composición mineral rica y equilibrada, con notables concentraciones de macro y micro elementos esenciales para el crecimiento vegetal, los macronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre y magnesio se encuentran en proporciones adecuadas, mientras que los micronutrientes como hierro, manganeso, zinc, cobre y boro contribuyen a una nutrición completa de las plantas, además, su contenido de materia orgánica, que incluye ácidos húmicos y fúlvicos, aporta beneficios significativos al suelo, las hormonas vegetales presentes, como ácido giberélico, ácido indolacético y kinetina, estimulan el crecimiento y la germinación de las semillas, con una carga microbiana diversa, que incluye actinomicetes, *Bacillus thuringiensis* y *Brevibacillus invocatus*, el producto promueve la salud del suelo y la división celular, sus propiedades físicas

y químicas, como la solubilidad en agua, pH entre 7,4 y 8,4, y su capacidad para incrementar el crecimiento radicular, hacen que sea un suplemento valioso para diversas aplicaciones agrícolas, con una dosis recomendada de 300 a 400 L/ha en el caso de frutales (Delgado, 2014; Avibiol, 2017).

Tabla 1. Composición mineral de Avibiol

Categoría	Elemento	Valor
Macro elementos	Nitrógeno	5000 ppm
	Fósforo	100 ppm
	Potasio	10000 ppm
	Calcio	100 ppm
	Azufre	100 ppm
	Magnesio	100 ppm
Micro elementos	Hierro	100 ppm
	Manganeso	200 ppm
	Zinc	100 ppm
	Cobre	10 ppm
	Boro	100 ppm
Materia orgánica	M. O. total	7 % a 14 %
	Ácidos húmicos	0,3 % a 1 %
	Ácidos fúlvicos	0,13 % a 2,63 %
	Extracto húmico total	0,4 % a 0,54 %
Hormonas vegetales	Ácido giberélico	26,12 ppm
	Ácido indolacético	21,5 ppm
	Kinetina	18,66 ppm
Carga microbiana	Actinomycetes	-
	Bacillus thuringiensis	-
	Bacillus thuringiensis kurstaki	-
	Brevibacillus invocatus	-
	Solibacillus silvestris	-
Ácidos orgánicos	Ácidos carboxílicos	2,86 %
	pH	7,4 a 8,4
	Solubilidad en agua	Altamente soluble
Dosis de aplicación	Hortalizas y cultivos anuales	120 a 200 L/ha
	Frutales	300 a 400 L/ha
	Hortalizas y cultivos anuales (Foliar)	5 a 10 L/200 L
	Frutales (Foliar)	5 a 10 L/200 L

DPTO técnico AVIBIL SAC, 2019

2.3.2. Monty's

El Carbón Líquido MONTY'S se destaca como un acondicionador de suelo derivado de componentes 100 % naturales, con propósitos específicos en la mejora de las propiedades físico-químicas del suelo, especialmente durante las fases iniciales de cultivo de

las plantas y a diferencia de los fertilizantes, este producto no busca reemplazarlos, sino complementar su acción. Su enfoque principal radica en optimizar el entorno radicular, facilitando la absorción de micronutrientes por las plantas y reduciendo la compactación del suelo, además, desempeña un papel clave en la regulación del pH y la disminución de los niveles de salinidad, contribuyendo así a un ambiente más propicio para el crecimiento vegetal.

Este acondicionador de suelo posee un análisis garantizado que revela importantes modificadores de suelo, como un 1 % de carbono orgánico y un 2 % de ácido húmico, ambos derivados del carbón marrón, componentes que son fundamentales para incrementar la retención de agua en el suelo, promover el desarrollo de bacterias beneficiosas como los rizoxperes y los hongos micorrícicos, y aumentar la capacidad de intercambio catiónico. Asimismo, actúa como un desbloqueador de nutrientes, facilitando su disponibilidad para las plantas. En resumen, el Carbón Líquido MONTY'S se presenta como una herramienta integral para la mejora de la calidad del suelo, favoreciendo un entorno propicio para el crecimiento saludable de las plantas.

Tabla 2. Composición detallada de Monty's Liquid Carbon

Componente	Porcentaje
Ácidos húmicos	2 %
Carbono orgánico	1 %
Otros ingredientes (agua)	97 %

Monty's Plant Food (2024)

2.4. Antecedentes del estudio

Se llevaron a cabo dos estudios en diferentes ubicaciones en Perú con el objetivo de evaluar el impacto de prácticas agrícolas en la producción de cacao y la acumulación de cadmio en los cultivos. En Palcazú, se investigó el "Efecto del abono orgánico líquido bajo la técnica drench en las propiedades del suelo y la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) Orgánico". Se implementaron cuatro tratamientos con distintas cantidades de abono orgánico líquido aplicado mediante la técnica drench. Aunque no se observaron mejoras en las propiedades del suelo, se registró un aumento significativo en el rendimiento del cacao, siendo el tratamiento T₃ (400 mL/planta de drench) el más destacado (Potesta, 2018).

En Lima, se llevó a cabo el estudio "Impacto de productos biodegradables aplicados al suelo sobre la acumulación de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.)". Se evaluaron diferentes productos biodegradables, como Avibiol, carbón líquido Monty's y Avical,

en distintas dosificaciones. Aunque se observó un incremento significativo en el peso seco de raicillas activas y en la cosecha de almendras con la aplicación de los productos en mayores dosificaciones, no se encontraron diferencias significativas en la extracción de cadmio. Sin embargo, se evidenció una tendencia a la disminución de la concentración de cadmio en el cacao con la aplicación de los productos probados. Estos resultados indican la influencia positiva de los productos biodegradables en la salud y rendimiento del cacao, aunque se requiere una mayor investigación para comprender completamente su impacto en la acumulación de cadmio (Dionisio, 2020).

El uso de enmiendas orgánicas para inmovilizar el cadmio en suelos agrícolas, abordando el problema global de este metal tóxico que persiste debido a su baja pérdida microbiana y química. Se destaca la creciente preocupación pública por la contaminación de suelos agrícolas con cadmio, impulsando el interés en técnicas rentables y respetuosas con el ambiente como la inmovilización *in situ* con enmiendas orgánicas. Se concluye que estas enmiendas tienen el potencial de reducir la captación de cadmio por las plantas al mejorar su inmovilización a través de procesos como la adsorción, intercambio iónico, complejación y precipitación (Huaraca-Fernández et al., 2020).

En Ecuador, la presencia de cadmio (Cd) en suelos cacaoteros plantea preocupaciones tanto para la comercialización de productos agrícolas a nivel nacional e internacional como para la salud de los consumidores. Este estudio evaluó los efectos de la omisión de macronutrientes en la absorción de Cd por plantas de arroz en seis suelos tropicales. Mediante un ensayo de invernadero con nueve tratamientos, incluyendo fertilización completa y omisiones individuales de nutrientes, se encontró que la fertilización completa estimuló la absorción de Cd en todas las provincias evaluadas. Las omisiones de nutrientes afectaron la absorción de Cd de manera variable, independientemente de las características del suelo. Estos resultados sugieren que la estrategia de omisión de macronutrientes puede ser efectiva para evaluar y controlar la absorción de Cd en diferentes condiciones edafoclimáticas, garantizando la seguridad de los productos destinados al consumo humano (Xavier et al., 2023).

En 2023, en Sincos, se realizó un estudio para evaluar el efecto de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio utilizando maíz y girasol en suelo contaminado. Se aplicaron seis tratamientos combinando dos especies de plantas (maíz y girasol) instaladas sin enmienda, con biocarbón y vermicompost, en macetas cubiertas. El mejor tratamiento fue el de girasol combinado con biochar, que logró una reducción del contenido de cadmio del 53,154 %. Se concluyó que tanto el maíz como el girasol actúan como especies fitoestabilizadoras y

excluseras, mientras que el vermicompost y el biochar mejoraron el rendimiento de las plantas y redujeron el contenido de cadmio en suelos contaminados (Castañeda y Canchan, 2023).

En 2023, en el Complejo Industrial Ventanas, Chile, se evaluó el efecto de dos enmiendas orgánicas en suelos contaminados con altos niveles de cobre, zinc y plomo. Se emplearon un vitivinícola modificado y un ácido húmico comercial en dosis de 50 y 100 toneladas por hectárea, durante un experimento de incubación de 60 días. El mejor tratamiento fue el residuo vitivinícola modificado, que logró reducir significativamente la bioaccesibilidad del cobre en algunos suelos. Se concluyó que ambas enmiendas aumentan el pH, la capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica del suelo, reduciendo la disponibilidad de cobre, zinc y plomo, aunque no se observaron diferencias significativas (Mardones, 2024).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se realizó en el vivero del Fundo Doña Alicia, situado en el Caserío Corazón de Jesús, distrito de Alexander Von Humboldt, provincia de Padre Abad, región de Ucayali. Las coordenadas UTM fueron tomadas en la puerta de entrada del vivero: 486624 m E y 9014482 m N, con una altitud de 261 metros sobre el nivel del mar (msnm).



Figura 1. Imagen satelital del campo experimental "Fundo Doña Alicia" y ubicación del vivero, en el distrito Alexander Von Humboldt, Ucayali (Landsat 8).

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales

- *Semillas Clones*: CCN-51 y CMP-15 (1 kg de cada clon)
- Suelo (3 m³).
- Enmienda orgánica Avibiol (a base de estiércol de gallina).
- Enmienda orgánica Monty's (Carbón líquido).
- Palas.
- Carretillas.
- Tamiz de metal (para cernir el suelo).
- Malla raschel.
- Bolsas de polietileno de 6 x 12 x 0.02 cm.

- Reglas milimétricas.
- Vernier digital.
- Libreta de campo.
- Marcadores.
- Lapiceros.
- Sulfato de cadmio octa-hidratado (EMSURE® ACS).

3.2.2. Análisis inicial del suelo

Después de tamizar todo el suelo extraído, se tomó una muestra de 1 kg, se codificó y se envió al laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía (UNAS) para su análisis de caracterización (Tabla 3). Los resultados indicaron que el suelo presenta una clase textural franco arenoso, con un 62 % de arena, el pH es alcalino (7,57), según Brady y Weil (2008). Sin embargo, el contenido de MO (1,86 %) y nitrógeno (0,09 %) fueron bajos (Havlin et al., 2016). Los niveles de fósforo y potasio disponible también se clasificaron como bajos con valores de 5,53 ppm y 184,32 ppm (Jones, 2003). En cuanto al Cd disponible (0,04 ppm) como el total (0,11 ppm) se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la EPA y la EEA, que oscilan entre 0,4 y 1 ppm para Cd disponible, y de 1 a 3 ppm para Cd total (EEA, 2022; EPA, 2023). Los cationes intercambiables, como Ca, Mg, K y Na, también presentaron niveles bajos según las clasificaciones del IUSS Working Group WRB (2015).

Tabla 3. Análisis inicial físico químico del suelo que se utilizó como sustrato.

Características	Unidades	Valores
Arena	%	62,00
Arcilla	%	18,00
Limo	%	19,00
Clase textural		Franco Arenoso
pH	01:01	7,57
Materia orgánica (M.O)	%	1,86
Nitrógeno (N)	%	0,09
Fósforo (P) disponible	ppm	5,53
Potasio (K) disponible	ppm	184,32
Cadmio disponible en suelo	ppm	0,04
Cadmio total en suelo	ppm	0,11
Ca	Cambiable Cmol(+)/kg	5,24
Mg	Cambiable Cmol(+)/kg	0,83
K	Cambiable Cmol(+)/kg	0,76
Na	Cambiable Cmol(+)/kg	0,28
Bases cambiables	%	100,00

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología – UNAS

3.2.3. Análisis de cadmio en almendras de cacao

Para este análisis, se separaron 200 g de semillas y se colocaron en sobres manila, los cuales fueron posteriormente secados en una estufa a 40 °C durante cinco días; luego de este proceso, las semillas fueron molidas, codificadas y enviadas al Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía (UNAS) para el análisis de Cd. Los resultados muestran que las semillas de cacao de los clones CCN-51 y CMP-15, utilizadas para la siembra, presentan concentraciones bajas de cadmio (Tabla 2). Específicamente, se encontró que la variedad CCN-51 tiene un contenido de cadmio de 0,12 ppm, mientras que la variedad CMP-15 muestra una concentración ligeramente mayor de 0,17 ppm. Estos niveles de Cd son relativamente bajos y podrían considerarse dentro de los límites aceptables para la seguridad alimentaria, según la Comisión del Codex Alimentarius, que establece normas internacionales para alimentos, siendo el límite máximo de Cd en grano de cacao y productos derivados es de 0,6 ppm (Codex Alimentarius Commission, 2020).

Tabla 4. Análisis de cadmio a las semillas de cacao.

Semillas se cacao	Contenido de cadmio
CCN-51	0,12 ppm
CMP-15	0,17 ppm

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología – UNAS

3.2.4. Metodología

La investigación se centró en la reducción de cadmio y el crecimiento de plántones de dos clones de cacao, CCN-51 y CMP-15, mediante la aplicación de dos enmiendas orgánicas líquidas (Avibiol y Carbón Monty's) en concentraciones del 15 % (150 ml/L de agua) y 30 % (300 ml/L de agua). Este enfoque integral permitió obtener una visión detallada de la interacción entre los clones, las enmiendas orgánicas y las distintas concentraciones, contribuyendo así a una comprensión más completa de los factores que afectan el crecimiento de plántones de cacao en el vivero y la mitigación del cadmio en el suelo y también en los plántones de cacao.

3.2.5. Tratamientos

Los tratamientos de investigación evaluaron la interacción entre clones de cacao (CCN-51 y CMP-15), enmiendas orgánicas líquidas (Avibiol y Monty's) a dos dosis (15 % y 30 % diluidas en agua), y la adición de 5 ppm de Cd; se incluyeron tratamientos adicionales sin enmiendas con cadmio (T₉ y T₁₀), y condiciones sin cadmio ni enmiendas como testigos absolutos (T₁₁ y T₁₂).

Tabla 5. Descripción de los tratamientos en estudio

Trat.	Descripción	Dosis/Aplicación (mL)					Solución/aplicación	
		1	2	3	4	5	Tratamiento	Planta
T ₁	CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % ml Avibiol	150	150	150	150	150	2000 ml	50 ml
T ₂	CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % ml Avibiol	300	300	300	300	300	2000 ml	50 ml
T ₃	CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % ml Monty's	150	150	150	150	150	2000 ml	50 ml
T ₄	CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % ml Monty's	300	300	300	300	300	2000 ml	50 ml
T ₅	CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % ml Avibiol	150	150	150	150	150	2000 ml	50 ml
T ₆	CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % ml Avibiol	300	300	300	300	300	2000 ml	50 ml
T ₇	CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % ml Monty's	150	150	150	150	150	2000 ml	50 ml
T ₈	CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % ml Monty's	300	300	300	300	300	2000 ml	50 ml
T ₉	CCN-51 + 5 ppm Cd	--	--	--	--	--	--	--
T ₁₀	CMP-15 + 5 ppm Cd	--	--	--	--	--	--	--
T ₁₁	CCN-51	--	--	--	--	--	--	--
T ₁₂	CMP-15	--	--	--	--	--	--	--

3.2.5.1. Diseño experimental

En la realización del experimento, se empleó el diseño estadístico completamente al azar (DCA), compuesto por un total de doce (12) tratamientos, cada uno con cuatro (4) repeticiones; el análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el programa InfoStat, con un nivel de significancia del 5 %, se calculó el coeficiente de variabilidad y se evaluaron las diferencias de medias mediante la prueba DGC, con un nivel de significancia establecido en $\alpha = 0,05$.

Modelo aditivo lineal

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Respuesta obtenida por efecto del *i-esimo* tratamiento en estudio en la *j-esimo* repetición.

μ = Media general del experimento.

α_i = Efecto del *i-esimo* tratamiento.

E_{ijkl} = Es el efecto aleatorio del error experimental entre el *i-esimo* tratamiento es estudio en el *j-esimo* repetición.

Para:

$i = 1, 2, \dots, \text{y } 12$ tratamientos en estudio

$j = 1, 2, 3 \text{ y } 4$ repeticiones

3.2.5.2. Esquema del análisis de varianza

El esquema del análisis de varianza se presenta en la (Tabla 4).

Tabla 1. Esquema del análisis de variancia.

F.V	gl	SC	CM	Fc
Tratamientos	t-1	SCt	SCt/t-1	CMt/CMError
Error experimental	tr(r-1)	SCError	SCError/ab(r-1)	
Total	abcr-1	SCTotales		

3.2.5.3. Características del campo experimental

- **Tratamientos**

- Número de tratamientos : 12
- Número de plantas/UE : 9
- Número de plantas evaluadas/UE : 4
- Número de plantas evaluadas/tratamiento : 16
- Número de plantas/tratamiento : 36

- **Repeticiones**

- Número de repeticiones : 4
- Número de plantas/repeticón : 108
- Número de plantas evaluadas/repeticón : 48
- Número de UE/repeticón : 12

- **Del sustrato**

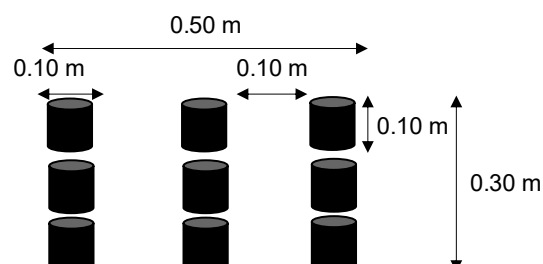
- Peso de sustrato/bolsa : 3 kg
- Peso de sustrato/UE : 27 kg
- Peso de sustrato/tratamiento : 144 kg

- **Del experimento**

- Número total de plantas : 432
- Peso total de sustrato : 1 296 kg

3.2.5.4. Croquis

En la investigación, se establecieron unidades experimentales (UE) compuestas por nueve plantas cada una, asegurando una distribución equitativa y homogénea (Figura 2).

**Figura 2.** Detalle de la unidad experimental.

La fase experimental incluyó 12 tratamientos dispuestos en cuatro repeticiones bajo un diseño completamente al azar, garantizando una distribución aleatoria y equitativa (Figura 3).

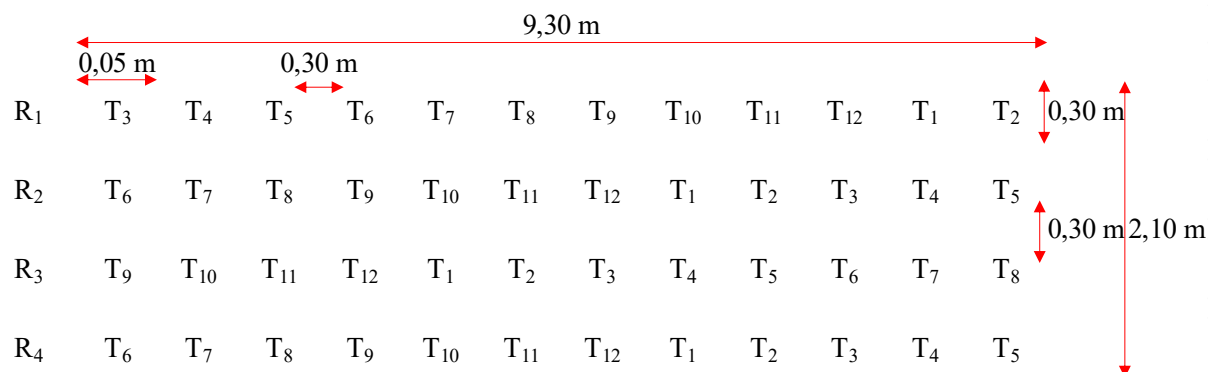


Figura 3. Croquis del campo experimental.

3.3. Conducción del experimento

3.3.1. Extracción de la tierra y preparación de sustrato

En la etapa inicial del experimento, se recolectaron aproximadamente 1000 kg de tierra agrícola de la capa superficial del suelo (0-10 cm); tras un proceso de secado y tamizado para obtener una textura fina, se extrajo una muestra representativa de aproximadamente 1 kg, la cual fue debidamente rotulada y enviada al Laboratorio de Suelo de la Facultad de Agronomía. En este laboratorio, se realizaron análisis detallados para determinar el contenido de Cd disponible y Total en el suelo, así como otras características físicas y químicas relevantes; este enfoque riguroso en la preparación y análisis del suelo estableció una base sólida para la investigación, proporcionando información esencial para la interpretación de los resultados experimentales y la comprensión de cómo el suelo puede influir en las respuestas de las plantas a los tratamientos aplicados.

3.3.2. Llenado y acomodo de las bolsas

Tras el proceso de tamizado de la tierra, se llevó a cabo la siguiente fase de llenar las bolsas (6 x 12 x 0,02 cm) manualmente; durante esta tarea, se depositó el sustrato tamizado en cada bolsa utilizando las manos aplicando una presión leve con los dedos para compactar el sustrato, logrando que las bolsas quedaran rígidas y sin deformaciones, evitando así la presencia de espacios vacíos en su interior. Se estableció como criterio que cada bolsa debía contener un peso de 2 kg, lo que contribuyó a mantener condiciones homogéneas entre las unidades experimentales; este proceso meticuloso en el llenado de las bolsas aseguró condiciones consistentes para el crecimiento de las plantas y facilitó la posterior aplicación de tratamientos, permitiendo una evaluación más precisa de los efectos de las variables en estudio.

3.3.3. Incubación con sulfato de cadmio

En la siguiente etapa del experimento, se preparó una solución de Cd con una concentración de 1000 ppm, disolviendo 2,2820 g de sulfato de Cd en 1 L de agua.

Utilizando la fórmula:

$$W_{\text{solución}} * C_{\text{solución}} = W_{\text{suelo}} * C_{\text{suelo}}$$

Considerando un peso de suelo de 2000 g (2 kg) y una concentración objetivo de 5 ppm de Cd, se calcularon las cantidades requeridas:

$$W_{\text{solución}} * 1000 \text{ mL} = 2000 \text{ g} * 5 \text{ ppm Cd}$$

$$W_{\text{solución}} = \frac{2000 \text{ g} * 5 \text{ ppm Cd}}{1000 \text{ mL}}$$

$$W_{\text{solución}} = 10 \text{ mL}$$

Se extrajeron 10 ml de la solución de 1000 ppm para cada bolsa. Antes de aplicar la solución, el sustrato se ajustó a su capacidad de campo y se dejó en reposo durante 6 horas. Luego, se adicionaron los 10 ml de la solución de Cd. Posteriormente, cada bolsa fue cubierta con una funda transparente, que se aseguró con un amarre, y se dejó en reposo durante 45 días, permitiendo que el Cd añadido se adsorbiera a las micelas coloidales del suelo.

3.3.4. Obtención y pre germinado de las semillas

En la fase de obtención de las semillas de cacao CCN-51 y CMP-15, se realizaron cuidadosas selecciones de mazorcas maduras y bien constituidas, preferiblemente ubicadas en el tercio superior del tronco, donde las semillas tienden a ser más grandes y vigorosas. Tras la extracción de las semillas, se llevó a cabo un proceso de eliminación del mucílago mediante frotación con aserrín blanco, contribuyendo así a limpiar y preparar las semillas para la fase de germinación; posteriormente, se procedió a la desinfección de las semillas de cacao, asegurando condiciones óptimas para la germinación y reduciendo posibles riesgos fitopatológicos; el germinado se llevó a cabo de manera controlada, y una vez que las semillas estuvieron pregerminadas, se procedió a depositarlas en cada una de las bolsas previamente preparadas. Este proceso detallado y meticuloso en la selección, limpieza y germinación de las semillas aseguró un punto de partida homogéneo para el crecimiento de las plantas y facilitó la posterior evaluación de su desarrollo en respuesta a los tratamientos aplicados.

3.3.5. Siembra de las semillas en las bolsas

Después de completar el proceso de pregerminado de las semillas, se llevó a cabo una cuidadosa selección en la que se escogió la semilla de cacao más viable en cada bolsa, dando preferencia a aquellas que mostraban una emisión más robusta de radícula. Se

procedió a depositar una semilla en cada bolsa, asegurándose de que la radícula quedara orientada de manera perpendicular al sustrato, la colocación de las semillas se realizó de manera que quedaran tapadas completamente por el sustrato, proporcionando las condiciones ideales para su desarrollo inicial. Este enfoque preciso en la siembra de las semillas aseguró condiciones uniformes entre las unidades experimentales y permitió una evaluación precisa de los efectos de los tratamientos aplicados en el crecimiento y desarrollo de las plantas a lo largo del estudio.

3.3.6. Aplicación de las enmiendas orgánicas Avibiol y Monty's

La primera aplicación de las enmiendas orgánicas líquidas, Avibiol y Monty's, se realizó 10 días antes de la siembra. Para ello, se preparó una solución de 2 L según las dosis planteadas ver Figura 3, y se aplicaron 50 mL de la solución a cada bolsa. Las aplicaciones posteriores se llevaron a cabo a los 15, 30, 45 y 60 días después de la instalación del experimento, aplicando el mismo volumen de solución (50 mL por bolsa) directamente al suelo. Estas aplicaciones se realizaron preferentemente durante las horas de la mañana o la tarde, considerando las condiciones climáticas para optimizar su efectividad.

3.3.7. Labores culturales.

Durante el desarrollo del experimento, se implementaron diversas prácticas agronómicas para garantizar el buen manejo y desarrollo de las plantas en estudio. En cuanto al riego, se estableció una frecuencia de cada 3 días, ajustándolo según las condiciones climáticas para asegurar un suministro de agua adecuado a las necesidades de las plantas, en paralelo, se llevó a cabo un riguroso control de malezas de forma manual, asegurándose de que las parcelas de estudio estuvieran siempre libres de competencia por luz, espacio y nutrientes; este control periódico permitió mantener un entorno propicio para el crecimiento de las plantas de cacao, además, se implementó un monitoreo constante para el control de plagas y enfermedades, llevando a cabo evaluaciones visuales de los tratamientos cada 15 días; este enfoque preventivo y de intervención manual garantizó un manejo efectivo de posibles amenazas bióticas, contribuyendo a la integridad y salud de las plantas a lo largo del experimento.

3.4. Variables evaluadas

3.4.1. Parámetros biométricos de los plantones de cacao

Durante el desarrollo del experimento, se implementó un riguroso plan de evaluación para monitorear el crecimiento y desarrollo de las plantas de cacao bajo diferentes tratamientos; se llevó a cabo la medición de la altura de las plantas cada 30 días, evaluando

cuatro plantas de cada UE de un tratamiento desde el nivel del sustrato hasta la yema terminal visible, utilizando una regla milimétrica y expresando las medidas en centímetros (cm), esta evaluación se realizó en cuatro ocasiones a lo largo del estudio. Asimismo, se efectuó la medición del diámetro del tallo de las plantas cada 30 días, midiendo a 2 cm del sustrato con un vernier digital y expresando las medidas en milímetros (mm), realizando también cuatro evaluaciones. El número de hojas de las plantas se contó visualmente cada 30 días, considerando solo las hojas bien formadas.

La evaluación de la longitud de raíz se llevó a cabo al final del experimento (120 días), se seleccionaron tres plantas al azar de cada tratamiento, se rompieron las bolsas, se retiró el suelo sin dañar las raíces, se lavaron con cuidado y se midió la longitud de las raíces con una regla graduada desde el cuello entre el tallo y la raíz hasta la parte terminal. Además, se midió el volumen sumergiendo las plántulas en una probeta graduada con agua y anotando el cambio en el nivel del agua, posteriormente, las muestras se colocaron en la estufa después de 72 horas, se enfriaron y se pesaron; el peso de materia seca (PMS) se calculó utilizando la fórmula:

$$PMS = \frac{\text{Peso fresco (PF)} * \text{Porcentaje de materia seca (MS\%)}}{100}$$

3.4.2. Análisis de cadmio

De las mismas plantas sacrificadas para evaluar las raíces y el peso de materia seca, el suelo de las tres plantas por UE se mezcló, obteniendo un total de 48 muestras, correspondientes a los 12 tratamientos con cuatro repeticiones cada uno. El volumen inicial de suelo mezclado por UE fue de aproximadamente 6 kg, el cual se redujo mediante el método de cuarteo hasta obtener una muestra representativa de aproximadamente 1 kg. Estas muestras fueron codificadas y enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) para analizar el contenido de Cd disponible en el suelo. El Laboratorio utilizó la siguiente metodología para el análisis de Cd disponible:

- Pesar 5 g de suelo y colocarlos en un vaso identificado.
- Agregar 20 ml de solución extractante (EDTA 0.05M; pH 7, ácido etilendiaminotetraacético).
- Agitar la mezcla durante 15 minutos.
- Filtrar con papel filtro Whatman N° 40.

- Realizar la lectura en un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) utilizando lámpara de Cd (228,8 nm, celda 0,5 nm) y patrones de Cd (1 ppm, 2 ppm y 3 ppm).

Simultáneamente, tras obtener el peso seco de la parte aérea de los plantones, las muestras fueron codificadas y enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía de la UNAS para determinar el contenido de Cd total de la parte aérea de los plantones de cacao, se empleó la metodología de digestión por vía seca:

- Pesar 2 g de muestra molida y colocarlos en un crisol identificado.
- Secar las muestras en una estufa a 105 °C durante 24 horas y pesar nuevamente.
- Calcinar en mufla a 450 °C durante 8 horas, dejar enfriar y humedecer con agua destilada.
- Agregar lentamente 2 ml de HCl concentrado y calentar en una plancha eléctrica hasta la evaporación completa.
- Repetir el proceso agregando 2 ml de agua destilada y 2 ml de HCl concentrado, calentando hasta evaporar.
- Transferir el contenido del crisol a una fiola de 100 ml con ayuda de agua caliente, filtrar y realizar la lectura en el EAA.

Este enfoque integral permitió evaluar la presencia y absorción de Cd tanto en el suelo como en los plantones de cacao, proporcionando una comprensión completa del efecto de los diferentes tratamientos en la acumulación de Cd en el sistema suelo-planta.

3.4.3. Análisis físico químico del sustrato

Del mismo suelo enviado al laboratorio para el análisis de Cd disponible, también se solicitó un análisis de caracterización que incluyó parámetros físicos y químicos como: textura, pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo disponible, potasio disponible, calcio, magnesio, sodio, potasio, aluminio e hidrógeno. Para llevar a cabo este análisis, el laboratorio empleó la siguiente metodología:

- Análisis granulométrico (% Ao, % Lo, % Ar): Método del hidrómetro de Bouyoucos.

- pH: Determinación mediante potenciómetro en una suspensión suelo-agua (1:1).
- Materia orgánica: Método de Walkley y Black.
- Fósforo disponible: Método de Olsen modificado, utilizando NaHCO_3 0.5M (pH 8,5) como extractor.
- Potasio disponible: Desplazamiento con acetato de amonio 1N (pH 7).
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Método del acetato de amonio 1N (pH 7) para suelos con $\text{pH} > 5,5$.
- Cationes cambiables:
 - Calcio (Ca): Medición mediante absorción atómica.
 - Magnesio (Mg): Medición mediante absorción atómica.
 - Potasio (K): Medición mediante absorción atómica.
 - Sodio (Na): Medición mediante absorción atómica.
- CIC efectiva: Determinación con KCl 1N para suelos con $\text{pH} < 5,5$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros biométricos de plántones de cacao

4.1.1. Altura

En la Tabla 6 se presenta el análisis de varianza (ANVA) para la altura de los plántones de cacao, evaluada en cuatro periodos: 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra. Los resultados muestran un patrón consistente de significancia en los efectos de los tratamientos sobre la altura de los plántones en todos los periodos analizados.

Tabla 6. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para la altura de plántones de cacao, evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra.

Días	Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor	CV	R ²
30	Tratamiento	270,68	11	24,61	82,87	<0,0001	3,06	0,96
	Error experimental	10,69	36	0,30				
	Total	281,37	47					
60	Tratamiento	662,94	11	60,27	11,79	<0,0001	8,98	0,78
	Error experimental	184,05	36	5,11				
	Total	846,99	47					
90	Tratamiento	1758,28	11	159,84	16,58	<0,0001	8,67	0,84
	Error experimental	347,07	36	9,64				
	Total	2105,35	47					
120	Tratamiento	2190,22	11	199,11	19,67	<0,0001	7,64	0,86
	Error experimental	364,43	36	10,12				
	Total	2554,65	47					

A los 30 días, el análisis revela un p-valor <0,0001, indicando diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de variación (CV) de 3,06 % evidencia una variabilidad controlada en las respuestas, mientras que el coeficiente de determinación (R²) de 0,96 demuestra que el 96 % de la variabilidad observada en la altura puede atribuirse a los tratamientos, reflejando un alto grado de control experimental en esta etapa inicial.

A los 60 días, el p-valor permanece <0,0001, confirmando la significancia de los tratamientos. Sin embargo, el R² disminuye a 0,78, lo que indica que una menor proporción de la variabilidad en la altura de los plántones se explica por los tratamientos en comparación con los 30 días. El CV aumenta a 8,98 %, sugiriendo una mayor diversidad en las respuestas de los plántones debido al avance en su desarrollo.

A los 90 días, los resultados muestran nuevamente un p-valor <0,0001, con un R² de 0,84, lo que refleja una ligera mejora en la explicación de la variabilidad por los tratamientos en comparación con los 60 días. El CV, ahora de 8,67 %, indica una leve reducción

en la variabilidad en relación con el periodo anterior, probablemente influida por factores intrínsecos a los tratamientos y el entorno experimental.

Finalmente, a los 120 días, el p-valor continúa siendo $<0,0001$, manteniéndose la significancia de los tratamientos. El R^2 se estabiliza en 0,86, mostrando una consistencia en la capacidad de los tratamientos para explicar la variabilidad. El CV disminuye a 7,64 %, señalando una reducción en la variabilidad interna en esta última etapa del estudio.

La Tabla 7 presenta los resultados de la prueba DGC ($\alpha = 0,05$) para la altura de los plántones de cacao evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra bajo diferentes tratamientos.

A los 30 días, los plántones mostraron variaciones en altura entre los tratamientos. Los tratamientos con enmiendas comenzaron a destacar, siendo T₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's) y T₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol) los más altos, ambos con una media de 20,05 cm. En contraste, los tratamientos testigo, como T₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd), T₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd), T₁₁ (CCN-5) y T₁₂ (CMP-15), registraron las menores alturas, con promedios de 14,94 a 13,51 cm.

A los 60 días, las alturas aumentaron significativamente, evidenciando un patrón claro en la respuesta a los tratamientos. T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's) alcanzó la mayor altura promedio, mientras que los tratamientos con enmiendas mostraron promedios entre 30,34 y 25,67 cm, siendo estadísticamente iguales. En cambio, los tratamientos testigo continuaron con alturas más bajas, de 22,32 a 18,39 cm. Estos resultados confirman el efecto positivo de las enmiendas orgánicas, especialmente en concentraciones del 30 %.

A los 90 días, T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol) presentó la mayor altura promedio (45,21 cm), seguido de T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's) con 42,74 cm, ambos estadísticamente iguales. Los tratamientos con clon CCN-51 a dosis del 30 % y 15 %, y CMP-15 con 15 %, también mostraron alturas significativas (39,92 a 36,42 cm), destacándose sobre los testigos. El tratamiento T₁₂ (CMP-15 sin enmienda) tuvo la menor altura promedio con 24,28 cm.

A los 120 días, T₆ y T₈ mantuvieron las mayores alturas promedio (51,91 y 49,26 cm, respectivamente), seguidos por los tratamientos con CCN-51 al 30 % y 15 %, y CMP-15 al 15 %, con promedios de 46,23 a 42,45 cm. Nuevamente, los tratamientos testigo presentaron las menores alturas, siendo T₁₂ el de menor desempeño (28,75 cm). En general, el clon CMP-15 mostró mejores resultados, alcanzando una altura máxima de 51,91 cm con Avibiol al 30 %, seguido de Monty's con 49,26 cm en la misma dosis.

Tabla 7. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de la altura de cacao evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra

Días	Tratamiento	Promedio	Sig.
30	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	20,05	a
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	20,05	a
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	19,52	a
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	19,39	a
	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	19,34	a
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	19,21	a
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	16,11	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	18,91	a
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	14,94	b
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	14,81	b
	T ₁₁ (CCN-51)	14,75	b
	T ₁₂ (CMP-15)	13,51	c
60	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	30,34	a
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	28,97	a
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	28,84	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	27,64	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	27,39	a
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	26,15	a
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	25,68	a
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	25,67	a
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	22,32	b
	T ₁₁ (CCN-51)	20,63	b
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	20,28	b
	T ₁₂ (CMP-15)	18,39	b
90	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	45,21	a
	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	42,74	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	39,92	b
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	38,88	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	38,76	b
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	38,04	b
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	37,13	b
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	36,42	b
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	30,94	c
	T ₁₁ (CCN-51)	29,59	c
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	27,71	c
	T ₁₂ (CMP-15)	24,28	d
120	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	51,91	a
	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	49,26	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	46,23	b
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Monty's)	45,11	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	44,99	b
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % mL Avibiol)	44,20	b
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Monty's)	43,22	b
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % mL Avibiol)	42,45	b
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	36,51	c
	T ₁₁ (CCN-51)	34,65	c
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	32,23	c
	T ₁₂ (CMP-15)	28,75	d

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Este comportamiento se explica por las propiedades químicas y biológicas de las enmiendas, que aportan nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, fundamentales para la división y elongación celular, según Vites (2018). Además, las enmiendas mitigaron los efectos del Cd en el suelo mediante la formación de complejos estables, reduciendo su biodisponibilidad (Alloway, 2013). La respuesta destacada del clon CMP-15 refleja su capacidad genética para aprovechar eficientemente los nutrientes, como lo sugieren Rodríguez et al. (2018). Estos hallazgos confirman que las enmiendas orgánicas, particularmente en dosis altas, promueven el crecimiento en altura y mitigan efectos adversos del Cd en los plántones de cacao.

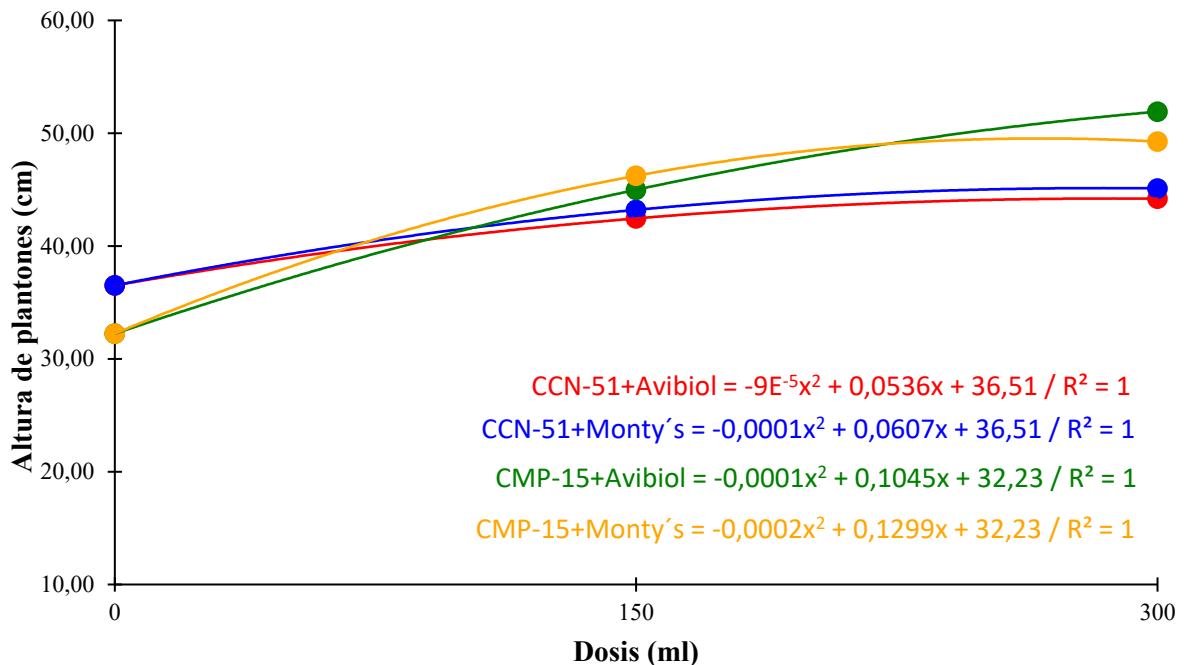


Figura 4. Efecto de las dosis de enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's, en dosis de 0, 150 y 300 ml) en cada clon sobre la altura de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

Para el clon CMP-15, se observó un mejor desempeño en la altura total de los plántones al aplicar 150 mL (15 %) de la enmienda Monty's, descrito por la ecuación $CMP-15+Monty's = -0,0002x^2 + 0,1299x + 32,23$, con $R^2=1$. Sin embargo, al incrementar la dosis a 30 % (300 mL), los plántones de cacao mostraron menor altura. En cambio, al utilizar la misma dosis de 30 % de la enmienda Avibiol, los plántones alcanzaron una mayor altura, según la ecuación $CMP-15+Avibiol = -0,0001x^2 + 0,1045x + 32,23$ con $R^2=1$, destacando la importancia de seleccionar tanto el tipo como la dosis adecuada de enmienda orgánica.

En el caso del clon CCN-51, la aplicación de Monty's generó la mayor altura, descrita por la ecuación $CCN-51+Monty's = -0,0001x^2 + 0,0607x + 36,51$ con $R^2=1$. Sin embargo, con Avibiol, el crecimiento fue menor, como lo indica la ecuación $CCN-51+Avibiol = -9E^{-5}x^2 + 0,0536x + 36,51$ con $R^2=1$. En ambos casos, al aumentar la dosis a 30 % (300 mL), el crecimiento de los plántones de cacao es menor en las dos enmiendas orgánicas líquidas utilizadas en el experimento (Monty's y Avibiol).

El término cuadrático negativo en las ecuaciones de ambos clones indica que el crecimiento de los plántones alcanza un punto máximo con dosis moderadas y luego el crecimiento es menor con dosis más altas. Este comportamiento sugiere que la dosis óptima está cerca de 300 mL.

Ambos clones respondieron positivamente a las enmiendas, aunque con diferencias notables en el crecimiento de altura. El clon CCN-51 mostró mayor rusticidad, presentando una altura relativamente elevada incluso sin enmiendas, lo que indica una menor dependencia de nutrientes adicionales. Por otro lado, el clon CMP-15 mostró un crecimiento más rápido con Avibiol, como lo refleja su coeficiente lineal más alto (0,1045). Esto sugiere que el clon CMP-15 se beneficia más de dosis crecientes de enmiendas, mientras que el clon CCN-51 experimenta un incremento más moderado. Estas diferencias resaltan la importancia de ajustar las prácticas de manejo según las características específicas de cada clon, tipo y dosis de enemiga orgánica.

4.1.2. Diámetro

El análisis de varianza (ANVA) para el diámetro de los plántones de cacao, evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra (Tabla 8), muestra resultados significativos en todas las etapas del estudio

A los 30 días, el p-valor ($<0,0001$) indica diferencias significativas entre los tratamientos. El CV de 1,79 % refleja alta precisión en las mediciones, mientras que el $R^2=0,77$ sugiere que el modelo explica el 77 % de la variabilidad en los datos, siendo un ajuste adecuado para estudios agronómicos.

A los 60 días, el p-valor permanece $<0,0001$, confirmando la significancia estadística de los tratamientos. Aunque el CV aumenta a 3,39 %, sigue dentro de los rangos aceptables, indicando una precisión considerable. El $R^2=0,95$ señala un excelente ajuste, explicando el 95 % de la variabilidad observada en esta fase.

A los 90 días, el p-valor se mantiene $<0,0001$, con un CV de 3,16 %, lo que evidencia una baja variabilidad en las mediciones. El $R^2=0,96$ reafirma la capacidad del modelo para explicar gran parte de la variación en el diámetro de los plantones.

Finalmente, a los 120 días, el p-valor sigue siendo $<0,0001$, mostrando una alta significancia en las diferencias entre los tratamientos. El CV es de 3,24 %, reflejando una baja variabilidad, mientras que el $R^2=0,91$ indica que el modelo mantiene un ajuste robusto, explicando el 91 % de la variabilidad total en esta etapa.

Tabla 8. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0.05$) para diámetro de plantones de cacao, evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra.

Días	Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor	CV	R ²
30	Tratamiento	0,55	11	0,05	11,25	$<0,0001$	1,79	0,77
	Error experimental	0,16	36	0,00				
	Total	0,71	47					
60	Tratamiento	20,64	11	1,88	66,22	$<0,0001$	3,39	0,95
	Error experimental	1,02	36	0,03				
	Total	21,66	47					
90	Tratamiento	26,98	11	2,45	76,12	$<0,0001$	3,16	0,96
	Error experimental	1,16	36	0,03				
	Total	28,14	47					
120	Tratamiento	12,81	11	1,16	32,50	$<0,0001$	3,24	0,91
	Error experimental	1,29	36	0,04				
	Total	14,10	47					

En la Tabla 9 se presenta el análisis del diámetro de los plantones de cacao, evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra, evidenciando diferencias significativas entre los tratamientos aplicados.

A los 30 días, el tratamiento T₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol) mostró el mayor diámetro promedio del tallo (3,93 mm), seguido de T₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's) con 3,85 mm. Ambos tratamientos, estadísticamente iguales, destacan como los mejores para el clon CCN-51 con las dos enmiendas en dosis de 30 % (300 mL). Otros tratamientos, como T₁, T₃, T₆, T₉, T₁₁ y T₈, presentaron diámetros similares, con valores entre 3,77 y 3,67 mm. Los menores valores se observaron en T₅, T₁₂, T₇ y T₁₀ (3,62 a 3,57 mm), correspondientes al clon CMP-15 con enmiendas al 15 % (150 mL), lo que indica un menor impacto de estas dosis en este clon. A los 60 días, los tratamientos con enmiendas orgánicas continuaron mostrando mejores resultados en comparación con los testigos. Los tratamientos T₈, T₄, T₂, T₇, T₆, T₃, T₁ y T₅ alcanzaron valores entre 5,57 y 5,13 mm, siendo estadísticamente iguales, excepto T₁ y T₅, que presentaron valores ligeramente menores.

Tabla 9. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de diámetro de cacao evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra.

Días	Tratamiento	Promedio	Sig.
30	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	3,93	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	3,85	a
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	3,77	b
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	3,77	b
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	3,72	b
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	3,72	b
	T ₁₁ (CCN-51)	3,72	b
	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	3,67	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	3,62	c
	T ₁₂ (CMP-15)	3,59	c
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	3,58	c
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	3,57	c
60	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	5,57	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	5,56	a
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	5,50	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	5,47	a
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	5,46	a
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	5,41	a
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	5,24	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	5,13	b
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	4,24	c
	T ₁₁ (CCN-51)	4,12	c
	T ₁₂ (CMP-15)	3,98	c
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	3,90	c
90	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	6,36	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	6,36	a
	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	6,35	a
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	6,20	a
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	6,15	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	6,09	a
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	6,08	a
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	6,04	a
	T ₁₁ (CCN-51)	4,79	b
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	4,76	b
	T ₁₂ (CMP-15)	4,53	c
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	4,47	c
120	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	6,36	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	6,36	a
	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	6,35	a
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	6,20	a
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	6,15	a
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	6,09	a
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	6,08	a
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	6,04	a
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	5,26	b
	T ₁₁ (CCN-51)	5,18	b
	T ₁₂ (CMP-15)	5,14	b
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	4,97	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En contraste (60 días), los testigos oscilaron entre 4,24 hasta 3,90 mm. Aunque el tratamiento T₂ destacó inicialmente, a los 60 días su crecimiento (5,50 mm) fue superado ligeramente por otros tratamientos con Monty's, reflejando una mejor respuesta progresiva de esta enmienda.

A los 90 días, los tratamientos con enmiendas continuaron promoviendo el mayor crecimiento en el diámetro del tallo, con promedios entre 6,36 hasta 6,04 mm; sobresalieron los tratamientos T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol) y T₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's), ambos con 6,36 mm, los testigos, como T₁₁ (CCN-51 sin enmienda) y T₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd), presentaron valores más bajos (4,79 y 4,76 mm). Los diámetros más reducidos correspondieron al clon CMP-15 en tratamientos sin enmiendas (4,53 y 4,47 mm), confirmando la importancia de las enmiendas orgánicas para este clon en etapas tempranas. A los 120 días, los diámetros promedio en los tratamientos con enmiendas orgánicas se estabilizaron en valores similares a los 90 días, lo que sugiere que el crecimiento en diámetro alcanzó su límite en esta etapa. En contraste, los tratamientos testigos mostraron un ligero incremento, con valores entre 4,97 y 5,18 mm, aunque permanecieron por debajo de los alcanzados con enmiendas. Los resultados resaltan la relevancia de las enmiendas orgánicas, especialmente Monty's y Avibiol al 30 %, para incrementar el diámetro del tallo, siendo más efectivos en el clon CMP-15, que depende más de la aplicación de nutrientes para su desarrollo óptimo.

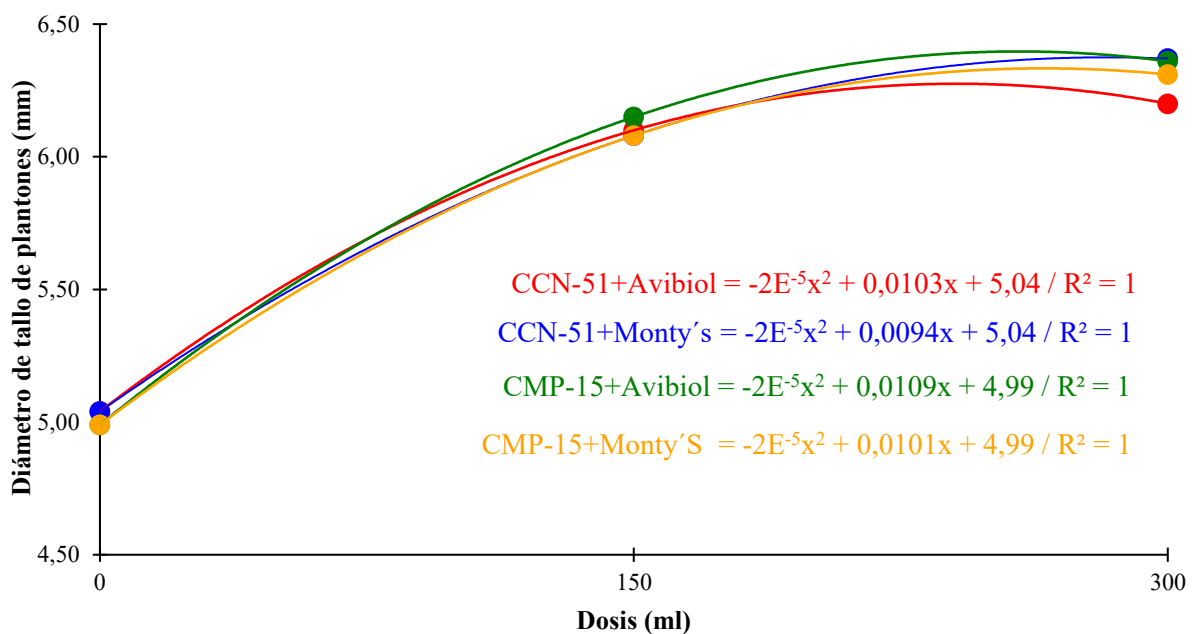


Figura 5. Efecto de dosis de enmiendas (Avibiol y Monty's, en dosis de 0, 150 y 300 ml) en cada clon sobre el diámetro del tallo de plántulas de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

En la Figura 5, a pesar de registrarse comportamientos muy similares de los modelos matemáticos, en el caso del clon CCN-51, se observó ligera superioridad al usar Monty's generando la ecuación de la forma $Y = -2E^{-5}x^2 + 0,0094x + 5,04 / R^2 = 1$, donde Y representa el diámetro del tallo en función de la dosis de enmienda líquida, se tiene que al no usar dosis alguna el diámetro inicial del tallo es de 5,04 mm, se observa un aumento moderado en el diámetro con la dosis hasta los 150 ml, seguido de un comportamiento cuadrático negativo donde el crecimiento se estabiliza y disminuye más allá del punto óptimo. Para el caso del clon CMP-15, el uso de las dosis de Avibiol genera la ecuación de la forma $Y = -2E^{-5}x^2 + 0,0109x + 4,99 / R^2 = 1$, donde el diámetro inicial sin dosificación es 4,99 mm, ligeramente inferior al de CCN-51, pero con un crecimiento más pronunciado a medida que aumenta la dosis. Ambas ecuaciones describen una relación parabólica con un máximo antes de estabilizarse. Esto sugiere que CCN-51 tiene una menor capacidad genética para optimizar los nutrientes aportados por las enmiendas, lo que coincide con lo reportado por Alloway (2013), quien explica que los efectos de los ácidos húmicos y fúlvicos pueden variar dependiendo de las características genéticas de la planta y su interacción con el suelo.

Aunque ambos clones de cacao muestran un patrón parabólico similar con un punto máximo de crecimiento en el diámetro del tallo, presentan diferencias significativas, en el caso del clon CCN 51, con Monty's, inicia con un diámetro ligeramente mayor (5,04 mm frente a 4,99 mm en CMP 15) y un crecimiento más moderado debido a su menor coeficiente lineal (0,0094x). Por su parte, el clon CMP 15 responde de manera más intensa a las dosis de Avibiol, como refleja su mayor pendiente (0,0109x), alcanzando un crecimiento más acelerado en comparación con CCN 51, sin embargo, ambas ecuaciones comparten el mismo término cuadrático ($-2E^{-5}x^2$), lo que implica una tasa similar de disminución después del punto máximo. Esto sugiere que Monty's es más adecuado para mantener diámetros iniciales mayores, mientras que Avibiol promueve un crecimiento más rápido en CMP 15. Este comportamiento es consistente con lo señalado por Rodríguez et al. (2018), quienes destacan la eficiencia del clon CMP-15 en el aprovechamiento de recursos del suelo, incluso en condiciones mejoradas con fertilizantes.

El incremento en el diámetro del tallo con dosis crecientes de enmiendas se debe a la mejora en la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, así como a los efectos beneficiosos de los compuestos orgánicos presentes en Monty's y Avibiol. Según Vites (2018), los biofertilizantes no solo incrementan la absorción de nutrientes, sino que también favorecen la formación de tejidos conductores robustos, necesarios para sostener el desarrollo estructural de la planta. Además, Lazo et al. (2014) mencionan que

la presencia de microorganismos activados por las enmiendas orgánicas mejora la eficiencia metabólica de las plantas, lo que contribuye al engrosamiento del tallo.

4.1.3. Número de hojas

El análisis de varianza del número de hojas de los plantones de cacao, evaluado entre los 30 y 120 días después de la siembra (Tabla 10), muestra cómo los tratamientos influyen progresivamente en este parámetro.

Tabla 10. Cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) para número de hojas de plantones de cacao, evaluada entre los 30 y 120 días después de la siembra

Días	Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor	CV	R ²
30	Tratamiento	3,23	11	0,29	1,21	0,3170	10,16	0,27
	Error experimental	8,75	36	0,24				
	Total	11,98	47					
60	Tratamiento	30,75	11	2,80	3,80	0,0011	10,89	0,54
	Error experimental	26,50	36	0,74				
	Total	57,25	47					
90	Tratamiento	20,06	11	1,82	2,60	0,0151	5,90	0,44
	Error experimental	25,25	36	0,70				
	Total	45,31	47					
120	Tratamiento	20,06	11	1,82	2,60	0,0151	5,90	0,44
	Error experimental	25,25	36	0,70				
	Total	45,31	47					

A los 30 días, el p-valor de 0,3170 indica que las diferencias entre tratamientos no son estadísticamente significativas. El CV de 10,16 % refleja una variabilidad moderada, mientras que el R² de 0,27 sugiere que solo el 27 % de la variabilidad observada se debe a efecto de los tratamientos, quedando el 73 % atribuido a factores ambientales o genéticos.

A los 60 días, el p-valor disminuye a 0,0011, lo que evidencia diferencias significativas entre los tratamientos. El R² aumenta a 0,54, indicando que más del 50 % de la variabilidad en el número de hojas se explica por los tratamientos aplicados. Aunque el CV se incrementa ligeramente a 10,89 %, sigue dentro de los rangos aceptables para estudios agronómicos.

A los 90 días, el p-valor de 0,0151 confirma diferencias significativas entre tratamientos. El CV se reduce a 5,90 %, lo que refleja una mayor precisión en las mediciones. Sin embargo, el R² disminuye a 0,44, lo que sugiere que el modelo explica solo el

44 % de la variabilidad, mientras que el resto se debe a factores externos como las condiciones ambientales o características genéticas.

Finalmente, a los 120 días, los resultados son consistentes con la evaluación de los 90 días, con un p-valor de 0,0151, un CV de 5,90 %, y un R² de 0,44. Esto indica que, en esta etapa, la emisión del número de hojas se estabiliza y el desarrollo se vuelve más lento, con una influencia limitada de los tratamientos sobre el crecimiento foliar.

Tabla 11. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de número de hojas de cacao evaluado entre los 60 y 120 días después de la siembra

Días	Tratamiento	Promedio	Sig.
60	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	10,25	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	8,25	b
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibioli)	8,25	b
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	8,00	b
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibioli)	7,75	b
	T ₁₁ (CCN-51)	7,75	b
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	7,50	b
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	7,50	b
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibioli)	7,50	b
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	7,50	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibioli)	7,25	b
	T ₁₂ (CMP-15)	7,00	b
90	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	15,50	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	15,00	a
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibioli)	14,75	a
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	14,50	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibioli)	14,25	b
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	14,25	b
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	14,00	b
	T ₁₁ (CCN-51)	14,00	b
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibioli)	13,75	b
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	13,75	b
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibioli)	13,25	b
	T ₁₂ (CMP-15)	13,25	b
120	T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	15,50	a
	T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	15,00	a
	T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibioli)	14,75	a
	T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	14,50	b
	T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibioli)	14,25	b
	T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	14,25	b
	T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	14,00	b
	T ₁₁ (CCN-51)	14,00	b
	T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibioli)	13,75	b
	T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	13,75	b
	T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibioli)	13,25	b
	T ₁₂ (CMP-15)	13,25	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Durante los primeros 30 días, el análisis de varianza (ANVA) revela que todos los tratamientos son estadísticamente iguales, sin diferencias significativas en el número promedio de hojas por planta. Asimismo, en la Tabla 11 se muestra la prueba de DGC a los 60, 90 y 120 días. A los 60 días, el tratamiento T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's) destacó significativamente con un promedio de 10,25 hojas/planta, consolidándose como el tratamiento más efectivo en esta etapa de desarrollo foliar. Los demás tratamientos presentaron valores promedio entre 7,00 y 8,25 hojas/planta, siendo estadísticamente similares entre sí.

A los 90 días, los tratamientos T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's), T₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's) y T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol) fueron los más efectivos, alcanzando promedios de 15,81; 15,00 y 14,75 hojas/planta, respectivamente. Estos tratamientos fueron estadísticamente iguales entre ellos, pero diferentes al resto, indicando que dosis más altas de enmiendas orgánicas favorecen un mayor desarrollo foliar, especialmente en el clon CMP-15.

Finalmente, a los 120 días, estos mismos tratamientos continuaron mostrando los mejores resultados en cuanto a la emisión de hojas, reafirmando la influencia positiva de las enmiendas orgánicas en dosis de 30 % (300 mL) en el desarrollo foliar de los plántones de cacao.

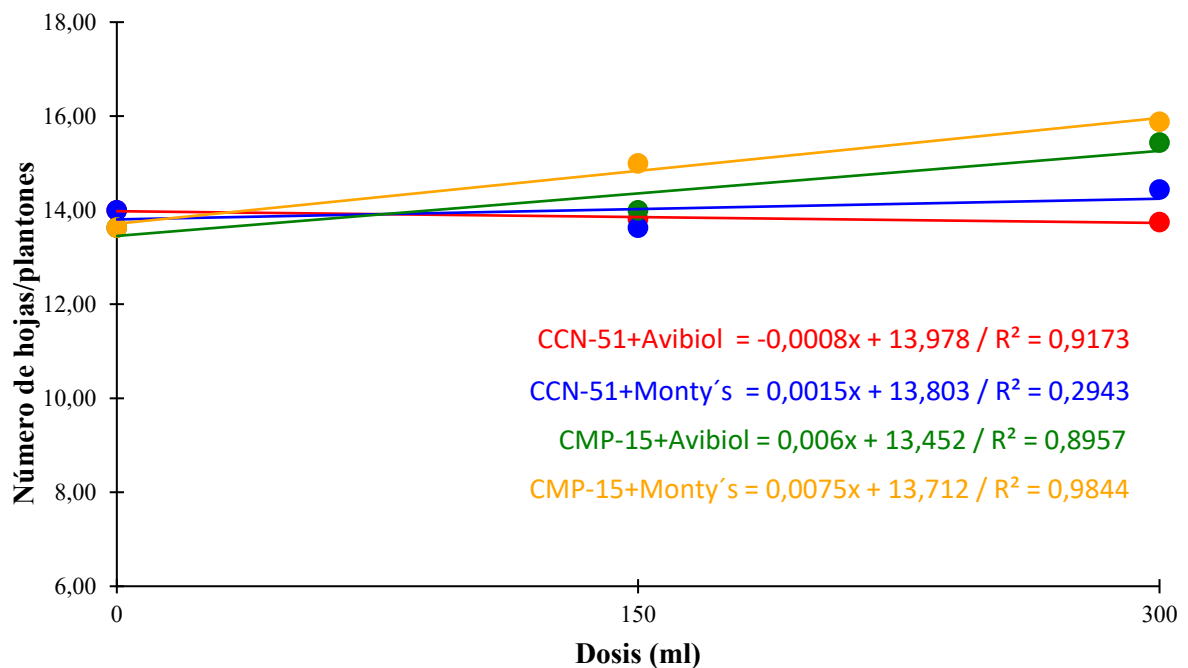


Figura 6. Efecto de dosis de enmiendas (Avibiol y Monty's, en dosis de 0, 150 y 300 ml) en cada clon sobre en el número de hojas de plántones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

A los 120 días, el número de hojas de los plantones de cacao mostró un incremento lineal con el aumento de las dosis de enmiendas orgánicas (0, 150 y 300 mL) (Figura 6). Según los modelos lineales ajustados, los tratamientos con Monty's y Avibiol en el clon CMP-15 presentaron las mejores respuestas, con ecuaciones de ajuste $Y=0,0094x+13,237$ ($R^2=0,955$) para Monty's y Avibiol $Y=0,0079x+12,977$ ($R^2=0,9855$). Esto indica que más del 95 % de la variabilidad en el número de hojas se explica por las dosis aplicadas, y que CMP-15 tuvo un mayor incremento en el número de hojas con el aumento de las dosis. Las pendientes más altas (0,00940 y 0,00790) también reflejan la mayor capacidad de este clon para responder positivamente a las enmiendas.

En contraste, el clon CCN-51 mostró respuestas más variables y menos pronunciadas. Para Monty's, la ecuación $Y=0,0021x+13,645$ presentó un $R^2=0,5485$, lo que indica que solo el 54,85 % de la variación en el número de hojas puede atribuirse a las dosis. Para Avibiol, la ecuación $Y=-0,0002x+13,82$ y un $R^2=0,75$ reflejan una respuesta muy limitada y, en algunos casos, negativa, lo que sugiere que CCN-51 tiene menor capacidad para beneficiarse de las enmiendas en comparación con CMP-15.

El efecto positivo de las enmiendas, especialmente en CMP-15, puede explicarse por su capacidad para mejorar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes clave como nitrógeno y fósforo, que son esenciales para el desarrollo foliar. Según Alloway (2013), los ácidos húmicos y fúlvicos en Monty's y Avibiol estimulan la división celular y la formación de hojas funcionales, incrementando así la capacidad fotosintética de las plantas. Además, Rodríguez et al. (2018) señalan que CMP-15 tiene una mayor eficiencia genética para aprovechar estos recursos en comparación con CCN-51.

4.1.4. Longitud y volumen de raíz

El análisis de varianza presentado en la Tabla 12, muestra los resultados del cuadrado medio para la longitud y el volumen de la raíz de los plantones de cacao evaluados a los 120 días después de la siembra. Para la longitud de raíz, se observa que el valor de F es 1.34 con un p-valor de 0,2638, lo cual indica que no existe una diferencia significativa entre los tratamientos a un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugiere que los tratamientos aplicados no influyen significativamente en la longitud de la raíz de los plantones de cacao. El coeficiente de variación (CV) de 9,22 % y el R^2 de 0,38 indican una baja variabilidad explicada por los tratamientos y una variabilidad moderada en los datos, lo que podría explicar la falta de significancia en este caso.

Por otro lado, para el volumen de raíz, el análisis de varianza muestra un valor de F de 5,20 con un p-valor de 0,0004, lo que indica una diferencia significativa entre los tratamientos a un nivel de confianza del 95 %. Este resultado sugiere que los tratamientos aplicados tienen un efecto significativo sobre el volumen de la raíz de los plantones de cacao. El coeficiente de variación (CV) de 14,26 % y un R^2 de 0,70 indican que una proporción considerable de la variabilidad en el volumen de raíz se explica por los tratamientos aplicados, lo que justifica la realización de la prueba de Duncan para identificar cuáles tratamientos difieren significativamente entre sí.

Tabla 12. Cuadrado medio del análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) de la longitud y volumen de raíz de plantones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

Fuente de variación	GL	Longitud de raíz			Volumen de raíz		
		CM	F	p-valor	CM	F	p-valor
Tratamiento	11	15,81	1,34	0,2638	5,72	5,20	0,0004
Error experimental	24	11,81			1,10		
Total	35						
CV		9,22			14,26		
R^2		0,38			0,70		

De acuerdo al análisis de varianza (Tabla 12), la longitud de raíz de los plantones de cacao, no presentó diferencias estadísticamente significativas en el análisis de varianza (p-valor = 0,2638). Este resultado indica que las variaciones observadas entre los tratamientos no pueden atribuirse de manera concluyente al efecto de las enmiendas. Sin embargo, al analizar las tendencias reflejadas en la (Figura 7), es posible identificar patrones diferenciados entre los clones CMP-15 y CCN-51, lo que permite una interpretación más detallada sobre la respuesta del sistema radicular en las condiciones de vivero.

En la Figura 7, el clon CCN 51, el uso de la enmienda líquida Avibiol se reflejó favorablemente mediante la ecuación $Y = 0,0001x^2 - 0,0297x + 38,13 / R^2 = 1$, lo que indica una relación perfecta entre la dosis (x) y la longitud de la raíz (Y); sin dosificación alguna, la longitud radicular alcanza 38,13 cm, el término cuadrático positivo ($0,0001x^2$) muestra un incremento lento en la longitud de la raíz con dosis crecientes, mientras que el término lineal negativo ($-0,0297x$) sugiere una ligera reducción antes de estabilizarse. Para el caso del clon CMP 15, la ecuación generada fue $Y = 0,0001x^2 - 0,0161x + 35,5 / R^2 = 1$, mostrando una longitud inicial menor sin dosis de 35,5 cm, con una disminución menos pronunciada por efecto del término lineal ($-0,0161x$) y una respuesta parabólica similar a medida que se incrementa la dosis. Este resultado podría estar relacionado con la menor

capacidad genética de CCN-51 para responder favorablemente a los cambios en la disponibilidad de nutrientes inducidos por las enmiendas, como lo sugieren Rodríguez et al. (2018). Además, Alloway (2013) señala que, en ciertos sistemas, un exceso de nutrientes en el suelo puede alterar el equilibrio osmótico en la rizosfera, dificultando la absorción de agua y afectando negativamente el crecimiento radicular. En este caso, la interacción entre las características genéticas del clon y las propiedades de las enmiendas pudo haber limitado el desarrollo radicular en CCN-51.

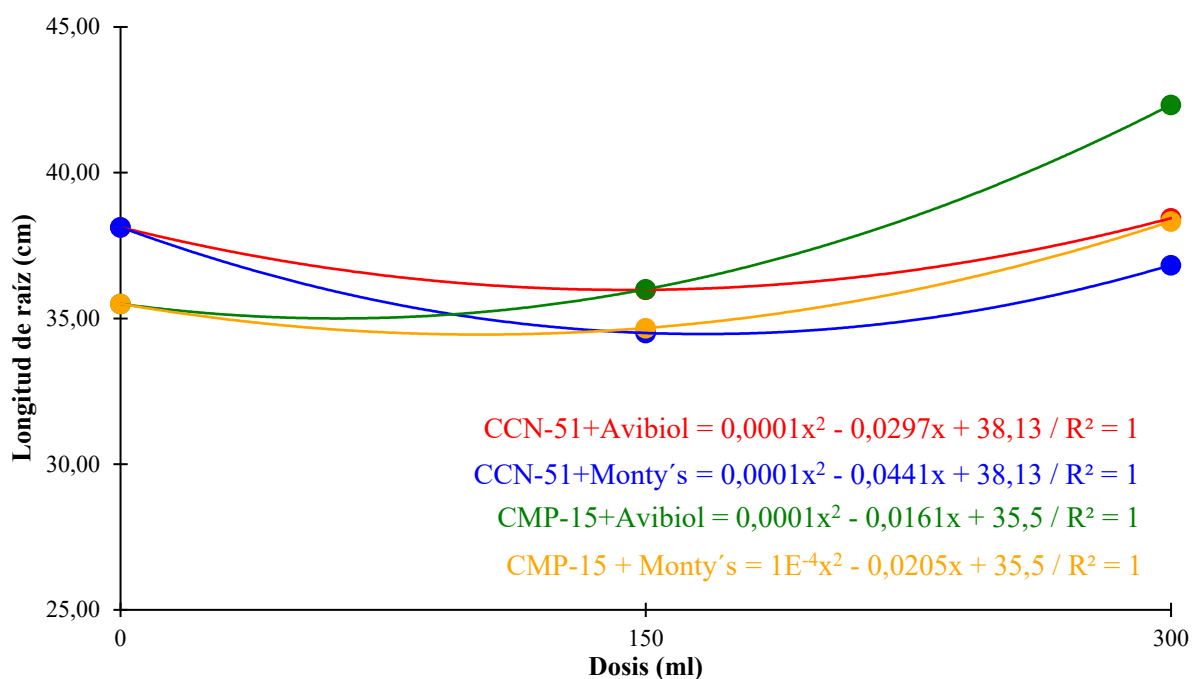


Figura 7. Impacto de las enmiendas (Avibiol y Monty's) y cadmio en la longitud de raíz de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

Aunque ambas ecuaciones comparten una estructura parabólica positiva con un comportamiento perfectamente ajustado ($R^2=1$), los clones muestran diferencias en sus parámetros iniciales y respuestas a la enmienda Avibiol, el clon CCN 51 tiene una longitud inicial mayor (38,13 cm frente a 35,5 cm en CMP 15) y experimenta una mayor reducción inicial en longitud debido al coeficiente lineal más negativo ($-0,0297x$ frente a $-0,0161x$ en CMP 15). Sin embargo, el término cuadrático positivo ($0,0001x^2$) es idéntico en ambos casos, lo que sugiere que, a mayor dosis de la enmienda orgánica, ambos clones tienden a estabilizar su crecimiento radicular. En conjunto, Avibiol parece favorecer más consistentemente la longitud de la raíz en CMP 15. Lo que podría deberse a las propiedades de esta enmienda para mejorar la estructura del suelo, estimular la actividad microbiana y aumentar la disponibilidad

de nutrientes esenciales como el fósforo, el cual juega un papel crucial en la elongación de raíces (Mengel y Kirkby, 2000; Alloway, 2013). Además, los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en Avibiol son conocidos por mejorar la absorción de nutrientes al estimular el desarrollo radicular, como lo reportan Lazo et al. (2014).

La falta de significancia estadística en la longitud de raíz puede deberse a la alta variabilidad intrínseca de este parámetro, que está influenciado no solo por la disponibilidad de nutrientes, sino también por factores como la textura y la humedad del suelo, la densidad de raíces secundarias y la capacidad de exploración del sistema radicular (Lazo et al., 2014; Mengel y Kirkby, 2000). Según Fernández-García et al. (2020), el desarrollo radicular no siempre responde directamente a la fertilización o al manejo del suelo, ya que depende de múltiples factores internos y externos que pueden enmascarar los efectos de los tratamientos.

Desde el punto de vista agronómico, la longitud de raíz puede ser relevante para evaluar la capacidad del sistema radicular de explorar el sustrato en vivero, pero su impacto en el desempeño general del plantón debe interpretarse con cautela. Como señalan Vites (2018) y Morales (2016), la calidad de un plantón en vivero está determinada por un conjunto de parámetros morfológicos y fisiológicos, entre los cuales la longitud de raíz es solo uno de los indicadores. En este estudio, aunque se realizó el análisis para identificar tendencias, los resultados indican que este parámetro no parece ser un factor determinante bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 13. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del volumen de raíz de plantones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra

Tratamientos	Volumen de raíz (cm ³)	Sig.
T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	9,83	a
T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	9,40	a
T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	8,67	b
T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	8,07	b
T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	7,50	b
T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	7,40	b
T ₁₁ (CCN-51)	6,67	b
T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	6,52	b
T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	6,40	b
T ₁₂ (CMP-15)	6,33	b
T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	6,00	b
T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	5,50	b

Medidas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El análisis de la prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) presentado en la Tabla 13, proporciona una comprensión detallada de cómo los diferentes tratamientos afectan el volumen

de raíz en los plántones de cacao a los 120 días después de la siembra. El análisis de varianza previamente realizado confirmó que los tratamientos tenían un efecto significativo sobre el volumen de raíz, y la prueba de DGC permite identificar cuáles tratamientos son los responsables de estas diferencias significativas.

Los tratamientos T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol) y T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's) mostraron los mayores volúmenes de raíz, con valores de 9,83 cm³ y 9,40 cm³, respectivamente. Ambos tratamientos pertenecen al grupo "a", lo que indica que son significativamente más efectivos en aumentar el volumen de raíz en comparación con otros tratamientos. Esto sugiere que la combinación de enmiendas orgánicas líquidas (Avibiol y Monty's) en dosis altas, junto con cadmio, tiene un impacto positivo y significativo en el desarrollo radicular del clon CMP-15.

Por otro lado, los resultados del análisis de suelo para el tratamiento T₆ revelan condiciones propicias que explican el incremento significativo en el volumen de las raíces. Un pH ligeramente alcalino de 7,26 proporciona un entorno óptimo para la disponibilidad de nutrientes esenciales, facilitando su absorción por las raíces. Aunque la materia orgánica se encuentra en niveles moderados (2,53 %), su presencia contribuye de manera significativa a la fertilidad del suelo y a la retención de nutrientes. La proporción equilibrada de nitrógeno (0,13 %), fósforo (25,35 ppm) y potasio (149,18 ppm) asegura un aporte nutricional fundamental para el desarrollo robusto de las raíces. Además, la alta presencia de cationes intercambiables, especialmente calcio (13,66 cmol(+)/kg) y magnesio (1,66 cmol(+)/kg), favorece la absorción eficiente de nutrientes, creando un entorno equilibrado y enriquecido que promueve un crecimiento radicular óptimo.

Estos resultados reflejan la interacción entre las propiedades del suelo y las características genéticas de cada clon, como señalan Torres-Guerrero et al. (2012). El suelo, al influir en la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de retención de agua, afecta directamente el desarrollo de las raíces, y esto es evidente en la respuesta diferencial de los clones CCN-51 y CMP-15 a los tratamientos. Aponte (2016) y Jaimes et al. (2022) respaldan que las diferencias genéticas y fisiológicas entre los clones son determinantes en la expresión de genes vinculados al desarrollo radicular, lo que explica por qué el clon CMP-15 mostró un mayor volumen de raíz bajo los tratamientos T₆ y T₈.

En contraste, otros tratamientos, como T₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd) y T₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol), que presentan volúmenes de raíz de 8,67 cm³ y 8,07 cm³, respectivamente, se encuentran en el grupo "b". Aunque estos tratamientos también son efectivos en aumentar el volumen de raíz, no alcanzan los niveles de efectividad observados en

los tratamientos del grupo "a". La capacidad del clon CCN-51 para mantener un volumen de raíz moderado incluso en ausencia de dosis elevadas de enmiendas, como en el tratamiento T₉, podría estar relacionada con su resistencia o capacidad adaptativa frente al Cd, como sugieren Montiel (2016) y Camarena et al. (2012), quienes enfatizan que las respuestas fisiológicas y la capacidad de absorción de nutrientes varían según el perfil genético de cada clon.

Los tratamientos con los menores volúmenes de raíz, como T₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol) y T₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's), con volúmenes de 6,00 cm³ y 5,50 cm³, respectivamente, también pertenecen al grupo "b". Aunque estos valores son menores, no son significativamente diferentes de otros tratamientos dentro del mismo grupo. Esto sugiere que, si bien las dosis más bajas de enmiendas no resultan en un gran incremento del volumen de raíz, aun así, proporcionan algún beneficio, lo cual es consistente con la literatura científica que resalta los beneficios de las enmiendas orgánicas líquidas en la mejora de la estructura del suelo y en la estimulación del crecimiento radicular de las plantas (Aponte, 2016; Jaimes et al., 2022).

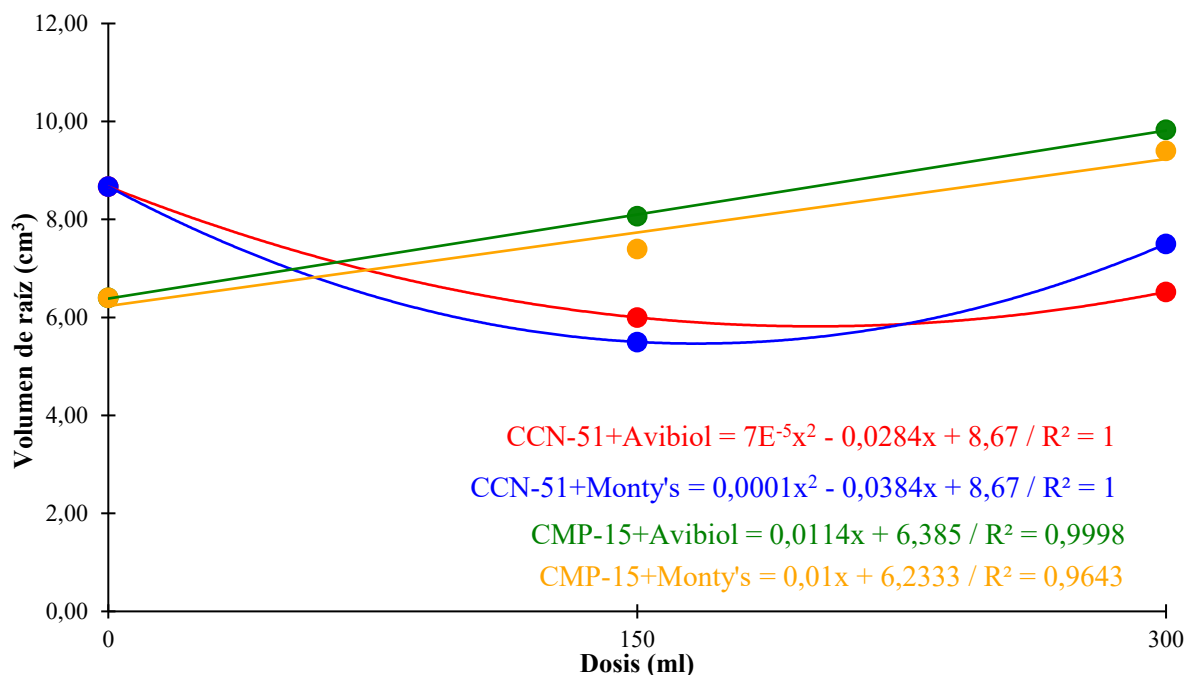


Figura 8. Efecto de las enmiendas (Avibiol y Monty's) en el volumen de raíz de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

En la Figura 8, el clon CCN 51, el volumen de la raíz con las dosis de Monty's se describe mediante la ecuación $Y = 0,0001x^2 - 0,0384x + 8,67 / R^2 = 1$, esto indica una relación perfecta entre la dosis (x) y el volumen de la raíz (Y), sin dosis alguna la raíz tiene

un volumen inicial de 8,67 cm³, el término cuadrático positivo (0,0001x²) sugiere un leve incremento en el volumen a medida que aumentan las dosis, aunque el término lineal negativo (-0,0384x) indica una ligera reducción inicial antes de estabilizarse y crecer nuevamente. Para el caso del clon CMP 15, con Avibiol, genera la ecuación $Y = 0,0114x + 6,385 / R^2 = 0,9998$, donde describe un aumento lineal directo del volumen, al no aplicar dosis de enmienda el volumen inicial es 6,385 cm³, menor que en CCN 51; el coeficiente lineal positivo (0,0114x) indica un aumento constante del volumen con cada incremento de dosis, sin mostrar estabilización o reducción. Esto indica que CCN-51 no solo no se beneficia tanto de las dosis más altas de enmiendas, sino que podría estar experimentando un efecto adverso bajo ciertas condiciones de tratamiento. Smith et al. (2019) y García-Ruíz et al. (2021) mencionan que la exposición al Cd puede desencadenar respuestas fisiológicas específicas en las plantas, lo que podría haber contribuido al menor volumen de raíces en CCN-51 bajo estas condiciones, sugiriendo que este clon podría estar limitado en su capacidad para adaptarse a niveles elevados de Cd en combinación con enmiendas.

Los clones muestran comportamientos distintos frente a las enmiendas, para el caso del CCN 51, aplicar Monty's genera un crecimiento parabólico, con una ligera disminución inicial del volumen antes de estabilizarse y aumentar, reflejando un volumen inicial más alto (8,67 cm³) y una relación bien definida ($R^2=1$). Por el contrario, CMP 15 presenta un crecimiento lineal constante con Avibiol, reflejado por su coeficiente positivo (0,0114x), lo que implica un aumento progresivo del volumen a medida que se incrementa la dosis, aunque el R^2 de CMP 15 (0,9998) es prácticamente perfecto, Monty's parece ser más adecuado para mantener volúmenes iniciales mayores en CCN 51, mientras que Avibiol promueve un crecimiento más consistente y predecible en CMP 15. La elección de una u otra enmienda orgánica dependerá de los objetivos como la obtención de volúmenes iniciales altos o incrementos sostenidos con la dosis. Esto sugiere que CMP-15 tiene la capacidad genética y fisiológica para optimizar su desarrollo radicular bajo estas condiciones, aprovechando al máximo las enmiendas aplicadas, lo cual es respaldado por Rodríguez et al. (2018) y Fernández-García et al. (2020), quienes destacan la respuesta positiva de este clon a las enmiendas orgánicas, especialmente con Avibiol en concentraciones elevadas

Finalmente, las enmiendas orgánicas ejercen un efecto fisiológico y nutricional beneficioso en el aumento del volumen de raíces de las plantas. Desde el punto de vista fisiológico, estas enmiendas contribuyen a mejorar la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes, proporcionando un entorno más propicio para el desarrollo radicular (Álvarez-Solís et al., 2010). Desde una perspectiva nutricional, las

enmiendas orgánicas, como Avibiol y Monty's, contienen nutrientes esenciales en formas fácilmente asimilables, lo que proporciona a las plantas los recursos necesarios para desarrollar un sistema radicular robusto, fomentando un mayor crecimiento en términos de volumen de raíces (Huaman, 2019; Espinosa-Antón et al., 2020). La combinación de mejora fisiológica y aporte nutricional, como lo describen Mengel y Kirkby (2000), contribuye a un aumento en el volumen de raíces de las plantas, lo que refuerza la importancia de las enmiendas orgánicas en la agricultura moderna.

4.1.5. Peso de materia seca

El análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) aplicado al peso de materia seca (PMS) de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15 a los 120 días después de la siembra mostró diferencias estadísticas significativas en los tratamientos. La baja variabilidad en los datos ($CV = 0,77\%$) y un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,96$) indican alta precisión y confiabilidad del modelo, que explica el 96 % de la variabilidad del PMS (Tabla 14).

Tabla 14. Cuadrado medio del análisis de varianza ($\alpha 0,05$) del porcentaje de materia seca de plantones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Tratamiento	21,07	11	1,92	57,46	<0,0001
Error experimental	0,80	24	0,03		
Total	21,87	35			
CV	0,77				
R ²	0,96				

El análisis de la prueba de DGC en la Tabla 15 muestra que los tratamientos con enmiendas orgánicas en dosis del 30 % (300 mL), como T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + Avibiol), T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + Monty's) y T₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + Avibiol), presentaron los valores más altos de peso de materia seca (PMS), con promedios de 24,98; 24,87 y 24,70 g, respectivamente. Estos resultados superan significativamente a los tratamientos testigos, que mostraron los menores valores de PMS, como T₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd), T₁₁ (CCN-51) y T₁₂ (CMP-15), con valores de 23,39; 23,21 y 22,12 g. Este patrón de respuesta refuerza la idea de que las enmiendas orgánicas, especialmente en dosis altas, tienen un efecto positivo en la acumulación de materia seca (MS), posiblemente debido a una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales (Cartagena, 2018). En línea con Castañeda y Canchan (2023), se observa que las enmiendas orgánicas mejoran la calidad del suelo, facilitando la absorción de nutrientes esenciales. Los tratamientos con dosis del 15 % (150 mL) mostraron PMS inferiores (23,70–24,12 g) en comparación con las dosis del 30 %, lo que indica que la

respuesta es dependiente de la dosis y de la interacción específica entre el clon y las enmiendas aplicadas. Esto también resalta que los efectos del Cd pueden ser modulados por la presencia de las enmiendas, reduciendo el impacto negativo de este metal pesado en el metabolismo de las plantas (Huaraca-Fernández et al., 2020).

Estudios previos, como los de Amanda (2016), señalan que la compleja interacción entre el Cd y las enmiendas orgánicas afecta de manera diversa el crecimiento de los plantones de cacao. Hernández-Baranda et al. (2018, 2019) explican que el Cd puede competir con nutrientes esenciales como Zn, Fe, Mn y Ca en los sitios de absorción radicular, alterando la estructura de proteínas y enzimas críticas para la acumulación de biomasa. La aplicación de enmiendas orgánicas podría mitigar estos efectos al mejorar la disponibilidad de nutrientes y reducir la fitotoxicidad del Cd. Marchive et al. (2021) refuerzan esta perspectiva al destacar que las enmiendas orgánicas no solo aportan nutrientes, sino que también modulan la interacción suelo-planta, facilitando un balance nutricional favorable para el desarrollo de los plantones. Sin embargo, los resultados también subrayan que las respuestas al Cd y a las enmiendas son multifactoriales, influenciadas por las características genéticas de los clones, la dosis específica y las condiciones del suelo.

Los resultados muestran que la aplicación de enmiendas orgánicas líquidas, especialmente en dosis del 30 %, promueve un incremento significativo del PMS en plantones de cacao (CCN-51 y CMP-15), mitigando los efectos adversos del Cd. Estos hallazgos destacan la importancia de ajustar las dosis y combinaciones de tratamientos para optimizar la acumulación de biomasa en los plantones.

Tabla 15. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del porcentaje de materia seca de plantones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

Tratamientos	Peso de materia seca	Sig.
T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	24,98	a
T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	24,87	a
T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	24,70	a
T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	24,36	b
T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	24,12	c
T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	23,93	c
T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	23,78	c
T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	23,70	c
T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	23,63	c
T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	23,39	d
T ₁₁ (CCN-51)	23,21	d
T ₁₂ (CMP-15)	22,12	e

Medidas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

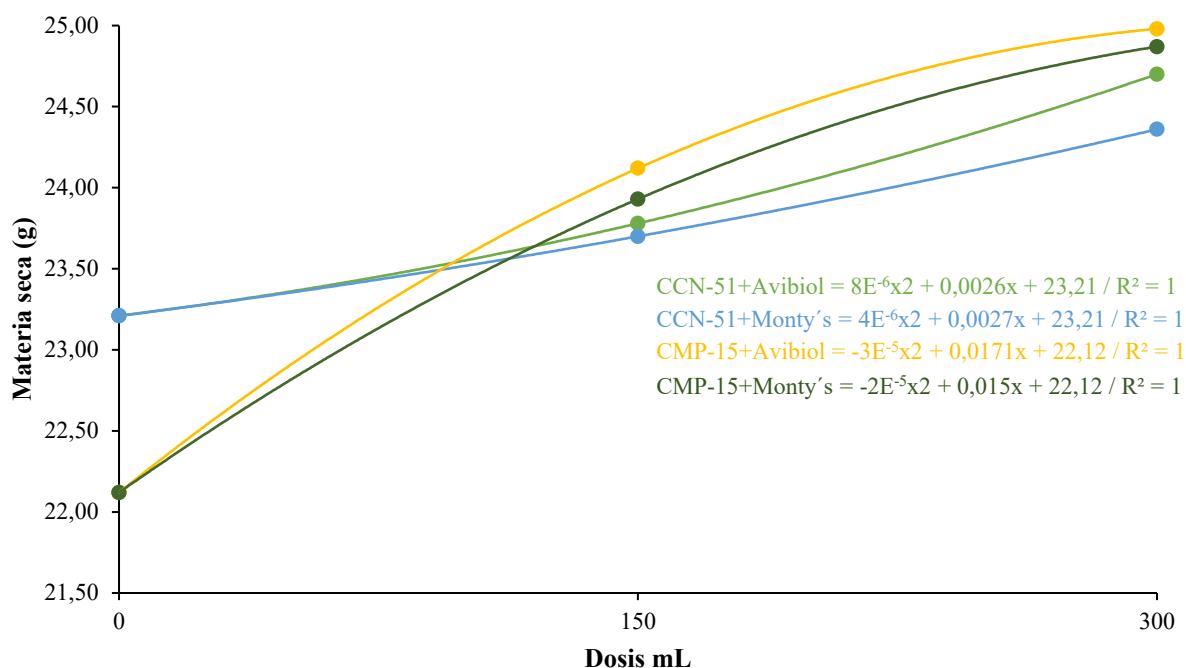


Figura 9. Efecto de las enmiendas (Avibiol y Monty's) y cadmio en la materia seca de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

La Figura 9 revela patrones claros sobre el efecto de las dosis de las enmiendas Avibiol y Monty's en el peso de materia seca (PMS) de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. Las fórmulas de las líneas de tendencia y los valores de R^2 (todos iguales a 1) indican que las relaciones entre la dosis y el PMS están perfectamente ajustadas, lo que proporciona una base sólida para interpretar los datos.

En el clon CCN-51, el PMS bajo la aplicación de Monty's sigue la ecuación: $\text{CCN-51+Monty's} = 4E^{-6}x^2 + 0,0027x + 23,21 / R^2 = 1$, lo que muestra un incremento progresivo del PMS a medida que aumenta la dosis. Sin embargo, los valores absolutos de PMS son menores en comparación con Avibiol. Con la enmienda Avibiol, el clon presentó un mayor PMS, descrito por la ecuación: $\text{CCN-51+Avibiol} = 8E^{-6}x^2 + 0,0026x + 23,21 / R^2 = 1$, reflejando un comportamiento similar de incremento, pero con mejores resultados en acumulación de biomasa.

En el clon CMP-15, el mayor PMS se observó también con Avibiol, cuya relación está descrita por la ecuación: $\text{CMP-15+Avibiol} = -3E^{-5}x^2 + 0,0171x + 22,12 / R^2 = 1$. Sin embargo, esta relación indica una tendencia negativa en la que, tras alcanzar un valor máximo, el PMS comienza a disminuir con dosis más altas. De manera similar, con Monty's, el comportamiento del clon CMP-15 también sigue una tendencia negativa, según la ecuación: $\text{CMP-15+Monty's} = -2E^{-5}x^2 + 0,015x + 22,12 / R^2 = 1$. Este comportamiento sugiere que, aunque

las enmiendas orgánicas líquidas favorecen la acumulación de biomasa, existe un umbral de dosis más allá del cual el efecto se invierte, particularmente en el clon CMP-15. Los resultados destacan que las dosis más altas de enmiendas orgánicas tienden a mejorar la biomasa en CCN-51, con una respuesta parabólica positiva. En cambio, CMP-15 muestra una relación parabólica negativa, lo que podría indicar una menor adaptación a las enmiendas Avibiol y Monty's. Este fenómeno podría deberse a diferencias genéticas entre los clones, así como a su capacidad para utilizar eficientemente los nutrientes suministrados por las enmiendas.

El Avibiol se posiciona como la enmienda más efectiva en ambos clones, especialmente en dosis más altas, mientras que Monty's presenta una eficacia más limitada, principalmente en CCN-51. Estos resultados subrayan la necesidad de considerar tanto el tipo de enmienda como el clon específico al diseñar estrategias para optimizar el crecimiento de plántulas de cacao. La interacción entre el clon y la enmienda aplicada es un factor determinante que puede influir significativamente en la acumulación de biomasa.

4.2. Análisis de cadmio

4.2.1. Cadmio disponible en suelo

La evaluación de la variabilidad de Cd en los suelos tratados con diferentes sustratos y enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) a dos niveles de dosificación (150 y 300 ml/L) reveló efectos significativos en los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. Según la Tabla 16, se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos ($p < 0,05$), lo que indica que al menos un tratamiento difiere significativamente. El coeficiente de variación (CV) fue del 5,32 %, clasificado como bajo según Pimentel (2000), quien considera que los CV inferiores al 10 % reflejan alta consistencia en los datos. El coeficiente de determinación (R^2) de 0,99 muestra que el modelo explica el 99 % de la variabilidad observada, lo que representa un ajuste casi perfecto del modelo, en línea con lo descrito por Novales (2010). Esto subraya la confiabilidad de los resultados y la fuerte influencia de las variables estudiadas en la respuesta de los suelos al Cd.

Tabla 16. Análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en el suelo de los sustratos evaluado a los 120 días de realizado el experimento

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Tratamiento	97,70	11	8,88	592,12	<0,0001
Error experimental	0,36	24	0,02		
Total	98,06	35			
CV	5,32				
R^2	0,99				

La interpretación de los resultados de la Tabla 17, nos muestra que el contenido de cadmio (Cd) en el suelo mostró una clara disminución con el incremento de las dosis de las enmiendas orgánicas Avibiol y Monty's, según los resultados obtenidos en la prueba DGC (Tabla 17). En los tratamientos sin enmiendas, el contenido de cadmio en el suelo fue significativamente más alto, alcanzando valores de 5,37 ppm en el tratamiento T₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd) y de 4,22 ppm en T₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd). Estos valores decrecieron conforme se aplicaron dosis crecientes de Avibiol y Monty's, con los niveles más bajos observados en T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's), que registró 0.68 ppm, y en T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol), con 1,26 ppm. Los testigos sin aplicación de cadmio (T₁₁ y T₁₂) presentaron niveles mínimos (0,03 y 0,02 ppm, respectivamente), sirviendo como referencia del contenido basal de Cd en el suelo.

Tabla 17. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en el suelo de los sustratos evaluado a los 120 días después de la siembra.

Tratamientos	Cadmio disponible en suelo	Sig.
T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	5,37	a
T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	4,22	b
T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	4,05	b
T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	3,36	c
T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	2,74	d
T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	2,61	d
T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	1,63	e
T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	1,6	e
T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	1,26	f
T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	0,68	g
T ₁₁ (CCN-51) no se aplicó Cd.	0,03	h
T ₁₂ (CMP-15) no se aplicó Cd.	0,02	h

Medidas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La Figura 10, confirma estas tendencias, mostrando una relación lineal negativa entre la dosis de las enmiendas y el contenido de Cd en el suelo, con coeficientes de determinación (R^2) elevados en todos los tratamientos, que varían de 0.8421 a 0.9994. Esto indica una alta consistencia en la reducción del Cd en función de las dosis aplicadas. Esta variable fue más relevante en los modelos donde más descendieron mientras se aplicaba las enmiendas, al respecto, en el clon CCN 51, el uso de la enmienda orgánica líquida Avibiol se describe mediante la ecuación $Y = -0,0126x + 5,1217 / R^2 = 0,9505$, lo que indica que el modelo explica el 95,05% de la variación en los niveles de cadmio en el sustrato (Y) en función de la dosis aplicada (x); sin dosificación de enmienda ($x=0$), el nivel de cadmio es de 5,1217 ppm, y el coeficiente negativo ($-0,0126x$) refleja una reducción constante del cadmio con cada

incremento de la dosis. En el caso del clon CMP 15, la ecuación fue de la forma $Y = -0,0099x + 3,85 / R^2 = 0,8421$, lo que sugiere que el 84,21 % de la variación es explicada por el modelo, el nivel inicial de cadmio es más bajo (3,85 ppm), y el coeficiente negativo ($-0,0099x$) indica una reducción más lenta del cadmio con el aumento de la dosis en comparación con CCN 51.

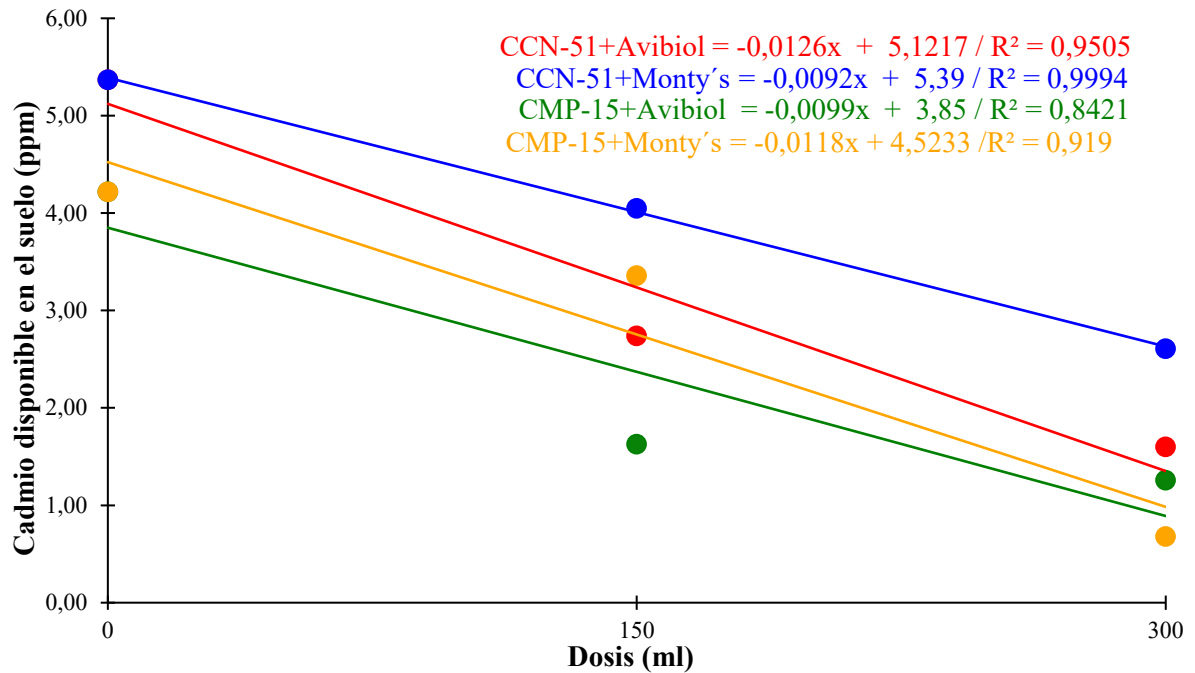


Figura 10. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) sobre la disponibilidad de cadmio en el sustrato para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

El impacto de la enmienda orgánica Avibiol en la reducción del cadmio en el sustrato difiere entre los clones, el clon CCN 51 comienza con un nivel inicial más alto de cadmio (5,1217 ppm) pero muestra una tasa de reducción más rápida ($-0,0126x$), lo que sugiere que esta enmienda es más efectiva en este clon para disminuir la contaminación. Además, el R^2 más alto (0,9505) indica que el modelo es más preciso para describir la relación dosis-cadmio en este clon. En contraste, CMP 15 presenta un nivel inicial menor (3,85 ppm) y una tasa de reducción más lenta ($-0,0099x$), con un ajuste estadístico menos robusto ($R^2=0,8421$), esto sugiere que, aunque la enmienda sigue siendo útil, su efectividad es moderada y menos consistente en CMP 15, por tanto, Avibiol tiene mayor impacto en la reducción de cadmio para CCN 51. La disminución del cadmio disponible en el suelo puede explicarse por las propiedades químicas y biológicas de las enmiendas orgánicas. Según Alloway (2013), los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en Avibiol y Monty's forman complejos estables con metales pesados como el Cd, disminuyendo su solubilidad y movilidad en el suelo. Esto reduce su

biodisponibilidad para las plantas y puede limitar su acumulación en los tejidos vegetales. Además, Lazo et al. (2014) señalan que la mejora en la actividad microbiana inducida por las enmiendas contribuye a la inmovilización del Cd, ya que los microorganismos pueden adsorber o precipitar metales pesados en formas menos solubles.

El comportamiento diferencial entre los clones también puede estar relacionado con las propiedades del sustrato y la interacción de las raíces con las enmiendas. Fernández-García et al. (2020) reportan que ciertas variedades de plantas pueden exudar compuestos que favorecen la formación de complejos con metales pesados, reduciendo su disponibilidad en la rizosfera. Esto podría explicar por qué CMP-15, en interacción con las dosis más altas de Monty's y Avibiol, presentó los niveles más bajos de Cd en el suelo.

4.2.2. Cadmio en plantones de cacao

El análisis de la varianza en relación con el contenido de Cd en plantones de dos clones de cacao (CCN-51 y CMP-15), influenciado por dos enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) en dos diferentes concentraciones (150 y 300 ml/L) (Tabla 18), revela notables diferencias estadísticas entre los tratamientos, esta disparidad está respaldada por un valor de probabilidad que cae por debajo del nivel preestablecido ($p < 0,05$), indicando de manera concluyente que al menos uno de los tratamientos difiere significativamente. El CV registrado es del 12,06 %, categorizado como medio según los estándares propuestos por Pimentel (2000), en el ámbito de los ensayos agrícolas de campo, se considera que los CV son bajos cuando son inferiores al 10 %, así, en el análisis del Cd en los plantones de cacao, el CV muestra una significancia moderada, además, el R^2 presenta un sólido valor del 0,98, lo que indica que el 98 % de la variabilidad en los resultados se puede atribuir a las variables estudiadas, según Novales (2010), valores cercanos a uno en el R^2 sugieren un alto ajuste del modelo a la variable, y en este caso, los resultados revelan una fuerte dependencia de las variables evaluadas en el presente estudio.

Tabla 18. Análisis de varianza ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en plantones evaluado a los 120 días de realizado el experimento.

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Tratamiento	16,64	11	1,51	95,54	<0,0001
Error experimental	0,38	24	0,02		
Total	17,02	35			
CV	12,06				
R^2	0,98				

El contenido de cadmio (Cd) en los plantones de cacao presentó variaciones significativas en función de las dosis de las enmiendas orgánicas Avibiol y Monty's, como lo muestran la Tabla 19. En los tratamientos sin enmiendas (T₉ y T₁₀), los valores de Cd en los plantones fueron de 0.96 y 0.90 ppm, respectivamente. Estos valores se redujeron considerablemente en tratamientos con dosis crecientes de enmiendas, alcanzando niveles mínimos de 0.58 ppm en T₂ (CCN-51 + 300 mL Avibiol) y 0.69 ppm en T₄ (CCN-51 + 300 mL Monty's). En CMP-15, aunque las concentraciones de Cd en los plantones fueron más altas en general, también se observó una disminución significativa con las dosis más altas de enmiendas, llegando a 1.16 ppm en T₆ (300 mL Avibiol) y 2.05 ppm en T₈ (300 mL Monty's).

Tabla 19. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) del contenido de cadmio en plantones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

Tratamientos	Cadmio en plantones	Significancia
T ₇ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	2,41	a
T ₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	2,05	b
T ₅ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	1,78	c
T ₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	1,16	d
T ₃ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Monty's)	0,98	e
T ₉ (CCN-51 + 5 ppm Cd)	0,96	e
T ₁₀ (CMP-15 + 5 ppm Cd)	0,90	f
T ₁ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 15 % Avibiol)	0,79	g
T ₄ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Monty's)	0,69	h
T ₂ (CCN-51 + 5 ppm Cd + 30 % Avibiol)	0,58	i
T ₁₁ (CCN-51)	0,14	j
T ₁₂ (CMP-15)	0,13	j

Medidas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La Figura 11 muestra los patrones del contenido de cadmio en los plantones de cacao según el clon y la enmienda orgánica aplicada. Para el clon CCN-51, la enmienda líquida Avibiol sigue un modelo lineal descrito por la ecuación $Y = -0,0013x + 0,9667$ ($R^2 = 0,9963$), lo que indica un ajuste casi perfecto. El contenido inicial de cadmio en los plantones (cuando $x=0$) es de 0,9667 ppm, y el coeficiente negativo ($-0,0013x$) refleja una disminución lineal del cadmio conforme aumenta la dosis de la enmienda.

En el caso del clon CMP-15, el modelo es de tipo parabólico, representado por la ecuación $Y = -3E^{-5}x^2 + 0,0109x + 0,9$ ($R^2 = 1$). Aquí, el contenido inicial de cadmio es más bajo (0,9 ppm). El término cuadrático ($-3E^{-5}x^2$) es muy pequeño, indicando cambios sutiles,

mientras que el término lineal positivo ($0,0109x$) sugiere un aumento inicial del cadmio con dosis bajas, seguido de una estabilización en valores más altos.

La dinámica de la reducción del cadmio en los plántones de cacao difiere entre los clones, para CCN 51, la relación es lineal y el contenido inicial de cadmio es mayor ($0,9667$ ppm), pero la disminución es consistente ($-0,0013x$), la precisión del modelo es alta ($R^2=0,9963$), mostrando que la enmienda es efectiva para reducir el cadmio de manera predecible. En el caso del clon CMP 15, el contenido inicial de cadmio es menor ($0,9$ ppm), pero la relación dosis-cadmio es parabólica, con un aumento inicial ($0,0109x$) antes de estabilizarse o disminuir levemente debido al pequeño coeficiente cuadrático ($-3E^{-5}x^2$), esto indica una respuesta más compleja a la enmienda, aunque el ajuste perfecto ($R^2=1$) asegura su precisión; en general, Avibiol es más directo y eficiente en CCN 51, mientras que en CMP 15 requiere un manejo cuidadoso para evitar el incremento inicial.

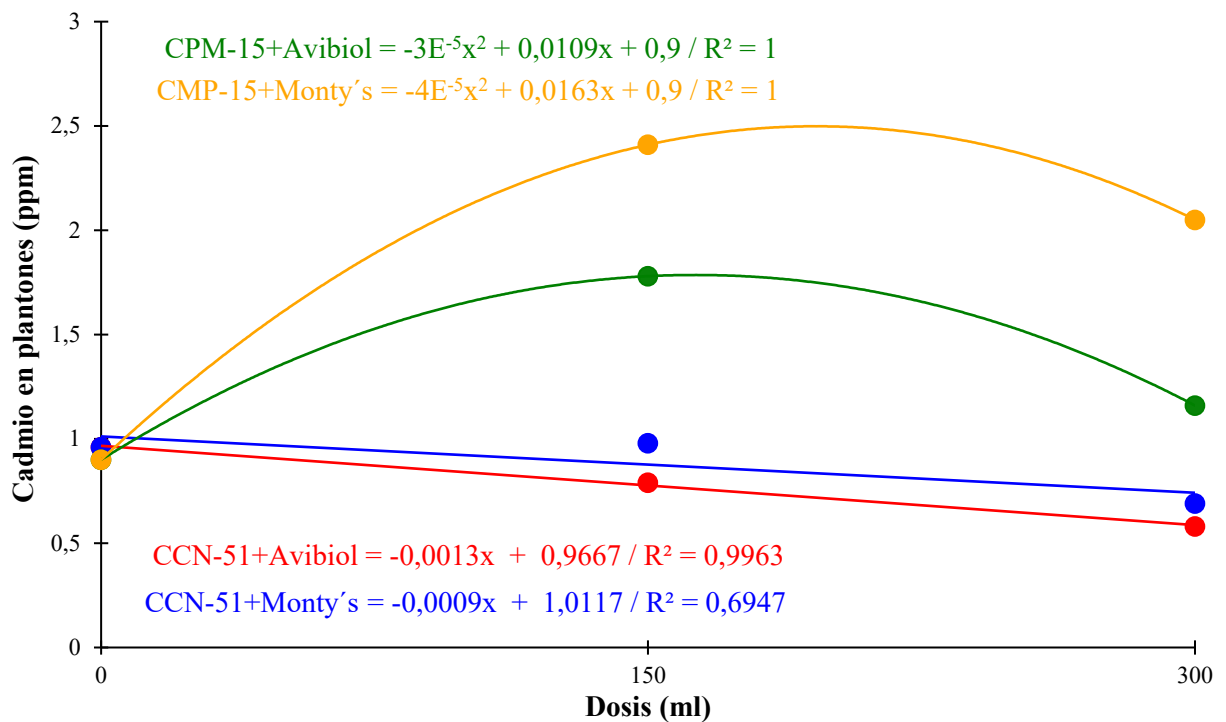


Figura 11. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) sobre el contenido de cadmio total en plántones de los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

La reducción del Cd en los plántones de CCN-51 puede atribuirse a las propiedades de las enmiendas para inmovilizar metales pesados en el suelo, reduciendo su biodisponibilidad para la absorción radicular. Según Alloway (2013), los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en las enmiendas orgánicas forman complejos estables con metales pesados

como el Cd, disminuyendo su movilidad y solubilidad en el suelo. Lazo et al. (2014) también destacan que el incremento de la actividad microbiana inducido por las enmiendas contribuye a la inmovilización del Cd, limitando su acumulación en los tejidos vegetales.

En CMP-15, los mayores niveles de Cd en los plántones, incluso en dosis altas de enmiendas, podrían estar relacionados con una mayor capacidad de este clon para absorber nutrientes junto con metales pesados, como lo sugieren Rodríguez et al. (2018). Este comportamiento podría deberse a una interacción específica entre las características genéticas del clon y las propiedades del sistema radicular, que permite una mayor eficiencia en la captación de elementos del suelo, incluidos aquellos que no son esenciales, como el Cd.

Estos resultados tienen implicaciones importantes en el manejo del Cd en suelos contaminados. Aunque las enmiendas orgánicas son efectivas para reducir la disponibilidad de Cd en el suelo, su eficacia en la reducción de Cd en los plántones depende tanto de la dosis aplicada como de las características genéticas del clon. En este sentido, las diferencias observadas entre CCN-51 y CMP-15 resaltan la importancia de seleccionar estrategias específicas de manejo para cada clon.

4.3. Análisis de sustratos

En el análisis del sustrato según los tratamientos (Tabla 20), se observa una consistente textura franco arenosa en todos los casos, con valores de pH que oscilan entre 7,21 y 7,96, indicando una ligera alcalinidad, destaca la variabilidad en los niveles de M.O, siendo los tratamientos T₁₀ y T₁₁ los que exhiben los valores más altos. El contenido de nitrógeno, fósforo y potasio varían entre tratamientos, sin mostrar un patrón claro, mientras que los cationes intercambiables revelan diferencias notorias, especialmente en los tratamientos aromático (CMP-15), T₅ y T₁₂, que presentan niveles más bajos en varios parámetros, la capacidad de intercambio catiónico se mantiene relativamente constante entre los tratamientos, señalando una buena capacidad para retener nutrientes en el sustrato, estos resultados sugieren una diversidad en las propiedades del sustrato, lo que puede influir en la productividad de los cultivos plantados, destacando la importancia de comprender y gestionar estas variabilidades para optimizar las condiciones de crecimiento. Entre los tratamientos evaluados, T₁₀ y T₁₁ destacan como opciones prometedoras, mostrando niveles superiores de M.O en el sustrato, esta característica podría favorecer la fertilidad del suelo y mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plantas, otros factores, como el pH y los cationes intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico se mantiene relativamente constante entre los tratamientos, indicando en general una buena capacidad para retener nutrientes en el sustrato.

Tabla 20. Análisis físico químico del sustrato al final del experimento

Tratamientos	TEXTURA	pH 1:1	M.O %	N %	P K disponible		CIC	Cambiables Cmol(+)/kg						
					ppm	ppm		Ca	Mg	K	Na	Al	H	
T ₁	CCN-51	Franco Arenoso	7,29	3,67	0,18	32,44	148,93	16,05	13,62	1,77	0,42	0,243	0,00	0,00
T ₂	CCN-51	Franco Arenoso	7,39	3,04	0,15	19,81	187,42	17,02	14,48	1,80	0,52	0,217	0,00	0,00
T ₃	CCN-51	Franco Arenoso	7,62	3,27	0,16	21,07	108,2	17,44	14,97	1,74	0,39	0,343	0,00	0,00
T ₄	CCN-51	Franco Arenoso	7,66	2,41	0,12	26,81	133,44	17,45	14,69	1,95	0,44	0,370	0,00	0,00
T ₅	Aromático (CMP-15)	Franco Arenoso	7,96	3,10	0,16	12,71	129,44	17,30	15,25	1,41	0,40	0,239	0,00	0,00
T ₆	Aromático (CMP-15)	Franco Arenoso	7,26	2,53	0,13	25,35	149,18	16,00	13,66	1,66	0,47	0,213	0,00	0,00
T ₇	Aromático (CMP-15)	Franco Arenoso	7,52	2,93	0,15	25,74	103,2	17,06	14,70	1,76	0,37	0,230	0,00	0,00
T ₈	Aromático (CMP-15)	Franco Arenoso	7,71	2,64	0,13	27,58	123,45	16,93	14,24	1,90	0,43	0,365	0,00	0,00
T ₉	CCN-51	Franco Arenoso	7,46	3,09	0,15	23,89	113,95	16,82	14,38	1,80	0,40	0,239	0,00	0,00
T ₁₀	Aromático (CMP-15)	Franco Arenoso	7,30	4,19	0,21	23,4	109,70	16,28	13,84	1,81	0,38	0,243	0,00	0,00
T ₁₁	CCN-51	Franco Arenoso	7,33	4,18	0,21	26,03	143,19	16,35	13,96	1,77	0,42	0,204	0,00	0,00
T ₁₂	Aromático (CMP-15)	Franco Arenoso	7,21	1,09	0,05	9,02	102,46	12,71	10,91	1,28	0,34	0,183	0,00	0,00
Análisis inicial		Franco Arenoso	7,57	1,86	0,09	5,53	184,32	7,11	5,24	0,83	0,76	0,28	0,00	0,00

Los resultados muestran textura franco arenosa y pH ligeramente alcalino (7,21-7,96), los cuales pueden favorecer la disponibilidad de nutrientes (Brady y Weil, 2008; Havlin et al., 2013). Los tratamientos T₁₀ y T₁₁ destacan por su alta porcentaje de M.O, lo cual es un factor que mejora la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes esenciales como N, P, y K (Lal, 2004; Marschner, 2012). Las diferencias en cationes intercambiables, reflejan variabilidad en la fertilidad del suelo; cuando la CIC es constante indica buena retención de nutrientes (White, 2003; Havlin et al., 2013). Esta diversidad en propiedades del sustrato puede influir en los plántones de cacao, resaltando la importancia de gestionar estas variabilidades para optimizar las condiciones de crecimiento (Tilman et al., 2002)

4.3.1. pH

La Figura 12, ilustra la variación del pH del suelo bajo la influencia de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) y cadmio para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. A lo largo de los tratamientos, se observa cómo los valores de pH cambian de manera diferencial entre los clones, mostrando respuestas particulares a las combinaciones de enmiendas y cadmio. En el testigo, donde no se aplicó cadmio ni enmiendas, el clon CCN-51 presenta un valor inicial de pH de 7,33, mientras que el clon CMP-15 comienza con un pH ligeramente más bajo de 7,21. Este valor base más bajo en CMP-15 puede reflejar diferencias en la composición del suelo o la capacidad de este clon para influir en las características químicas del sustrato.

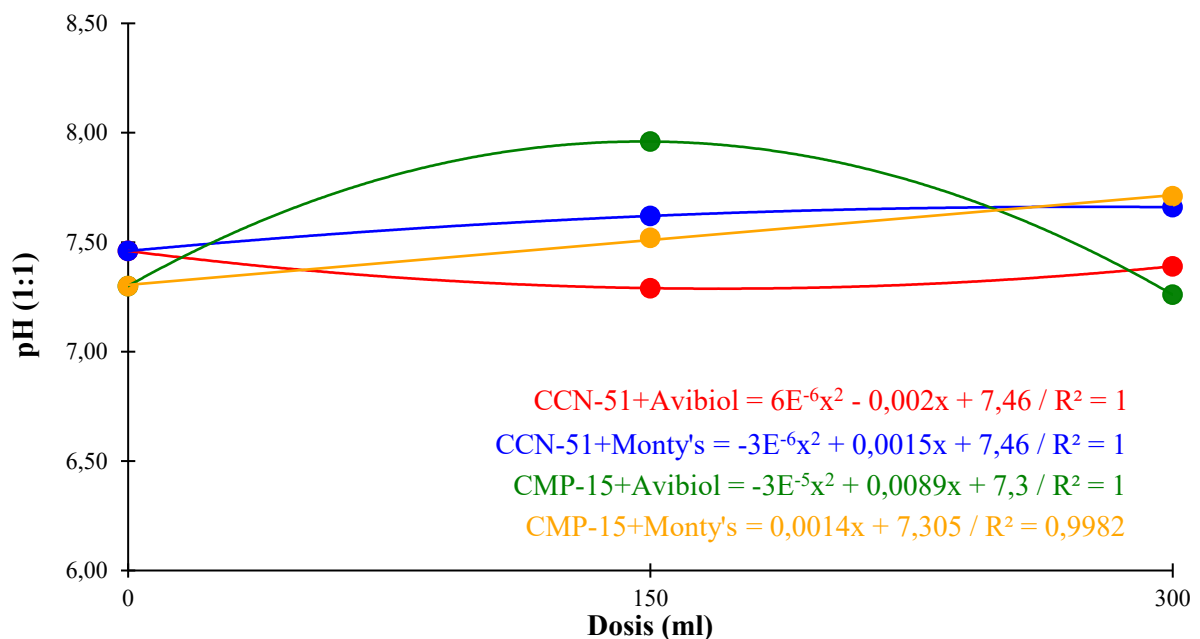


Figura 12. Variación del pH del suelo bajo la influencia de enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

Con la adición de 5 ppm de Cd sin enmiendas, se observa un incremento leve en el pH para ambos clones. El clon CCN-51 pasa de 7,33 a 7,46, mientras que el clon CMP-15 también aumenta de 7,21 a 7,3. Este incremento puede estar relacionado con la reacción del suelo ante la presencia de cadmio, que a menudo puede influir en la alcalinidad del medio. Sin embargo, la magnitud del cambio es relativamente pequeña en ambos clones, lo que sugiere que el cadmio solo tiene un impacto moderado sobre el pH del suelo en ausencia de enmiendas.

Al aplicar 150 mL de Monty's + Cadmio, el pH continúa aumentando en ambos clones. El clon CCN-51 muestra un incremento a 7,62, mientras que el clon CMP-15 alcanza un valor de 7,52. Estos valores sugieren que Monty's en dosis más bajas comienza a tener un efecto notable sobre la alcalinidad del suelo, posiblemente debido a la acción de los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en la enmienda, que pueden modificar la estructura del suelo y su capacidad de retener cationes básicos.

Cuando la dosis de Monty's aumenta a 300 mL + Cadmio, se observa un comportamiento divergente entre los clones. El clon CCN-51 alcanza su valor máximo de pH en 7,66, mientras que el clon CMP-15 presenta un valor significativamente más alto de 7,96. Este aumento pronunciado en CMP-15 podría estar relacionado con una mayor capacidad de Monty's para formar complejos estables con los cationes en este clon, lo que mejora la retención de nutrientes y contribuye a un pH más elevado. En contraste, aunque el pH en CCN-51 también aumenta, lo hace de manera más moderada, lo que indica una respuesta menos intensa a la mayor dosis de Monty's.

Con la adición de 150 mL de Avibiol + Cadmio, se observa una ligera disminución en el pH para ambos clones en comparación con los tratamientos anteriores. El clon CCN-51 presenta un valor de 7,29, mientras que CMP-15 baja a 7,39. Esta caída en el pH podría deberse a que Avibiol, en comparación con Monty's, no logra aumentar de manera tan eficaz la alcalinidad del suelo, lo que sugiere que su capacidad para modificar el pH depende de la dosis y del clon.

Finalmente, al aplicar 300 mL de Avibiol + Cadmio, el pH disminuye aún más en CCN-51, alcanzando 7,26, mientras que en CMP-15 el pH se mantiene ligeramente más alto en 7,39. Este comportamiento indica que Avibiol en dosis más altas tiene un efecto moderador sobre el pH del suelo, reduciendo la alcalinidad en CCN-51 de manera más notable que en CMP-15.

En la Figura 12, el clon CCN 51, el pH del sustrato en respuesta al uso de la enmienda Monty's está modelado por la ecuación $Y = -3E^{-6}x^2 + 0,0015x + 7,46 / R^2 = 1$, esto

indica que el pH inicial del sustrato es 7,46, cercano a neutralidad, y la relación dosis-pH sigue una trayectoria parabólica de muy baja curvatura, lo que refleja cambios mínimos en el pH a medida que aumenta la dosis de la enmienda, el término cuadrático negativo ($-3E^{-6}x^2$) sugiere que el pH podría estabilizarse o disminuir levemente a dosis más altas, aunque el cambio es prácticamente imperceptible. Para el caso del clon CMP 15, el pH se describe mediante la ecuación lineal $Y = 0,0014x + 7,305 / R^2 = 0,9982$, indicando un excelente ajuste, el pH inicial del sustrato es más bajo (7,305), y el término lineal positivo (0,0014x) refleja un incremento leve y consistente en el pH conforme aumenta la dosis de la enmienda.

El impacto de la enmienda Monty's en el pH del sustrato presenta diferencias sutiles entre los clones, en el clon CCN 51, el modelo es parabólico con un pH inicial más alto (7,46), y el cambio inducido por la dosis es prácticamente constante debido al coeficiente cuadrático muy pequeño ($-3E^{-6}$), esto sugiere que Monty's tiene un efecto neutralizador más estable en este clon. En el caso del clon CMP 15, el modelo lineal con un pH inicial más bajo (7,305) refleja un aumento más directo y consistente del pH (0,0014x) con la dosis aplicada; aunque ambos modelos muestran que la enmienda tiene un efecto positivo en el pH del sustrato, Monty's parece ser ligeramente más efectivo en CCN 51 para mantener la estabilidad del pH, mientras que en CMP 15 promueve un incremento más gradual pero constante hacia la neutralidad.

Estos resultados pueden estar respaldados por estudios que indican que las enmiendas orgánicas tienen la capacidad de influir en el pH del suelo, alterando su acidez o alcalinidad debido a la incorporación de materia orgánica y la promoción del crecimiento de microorganismos que afectan la química del suelo (Lahive et al., 2018). Los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en Monty's y Avibiol pueden estabilizar la estructura del suelo, reteniendo nutrientes y facilitando una ligera alcalinización en algunos casos. Este proceso explicaría los aumentos observados en CMP-15 y CCN-51, especialmente en presencia de Monty's, donde la estructura mejorada del suelo y la retención de cationes contribuyen a elevar el pH. En cambio, la menor respuesta en CCN-51 con Avibiol podría reflejar una menor capacidad de esta enmienda para influir en el pH a las dosis aplicadas.

4.3.2. Materia orgánica

La Figura 13, muestra la variación en el contenido de materia orgánica (M.O.) del suelo bajo la influencia de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) y cadmio en los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. Las líneas de tendencia en la gráfica proporcionan

información clave sobre cómo los tratamientos afectaron el contenido de M.O. en ambos clones a lo largo del experimento.

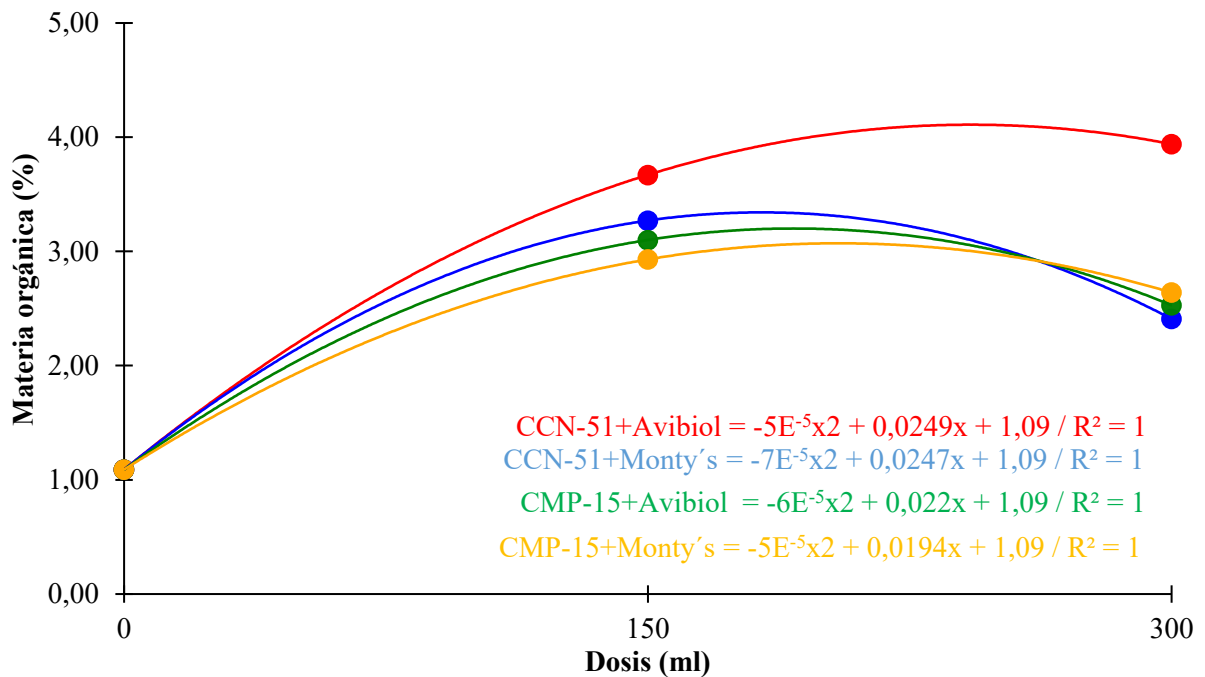


Figura 13. Efecto de las enmiendas (Avibiol y Monty's), en distintas dosis, sobre el contenido de materia orgánica del suelo en los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

En el tratamiento sin la aplicación de cadmio ni enmiendas, el clon CCN-51 presenta un valor de 4,18 % de M.O., mientras que el clon CMP-15 inicia con un valor mucho menor de 1,09 %. La diferencia inicial puede estar influenciada por la capacidad de cada clon de mantener materia orgánica en el suelo sin la intervención de factores externos.

Con la aplicación de 5 ppm de Cd sin enmiendas, CCN-51 experimenta una disminución significativa en la M.O. a 3,09 %, mientras que CMP-15 muestra un aumento a 4,19 %. Esto sugiere que el Cd podría estar afectando negativamente a CCN-51, inhibiendo la actividad microbiana encargada de la descomposición de la materia orgánica. Según McGrath et al. (2000), los metales pesados como el Cd pueden alterar la estructura del suelo y reducir la actividad de los microorganismos descomponedores, lo que afecta negativamente el ciclo de nutrientes. En contraste, CMP-15 parece menos afectado por la presencia de cadmio en este punto, lo que indica posibles diferencias en la tolerancia entre los clones.

Cuando se introduce 150 mL de Monty's + Cd, la M.O. en CCN-51 asciende a 3,27 %, mientras que en CMP-15 desciende a 2,93%. Las reducciones en uno de los clones sugieren que la combinación de enmiendas orgánicas con cadmio podría estar afectando la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos responsables de la descomposición de

la M.O., un fenómeno que McGrath et al. (2000) ya había observado. La complejación del Cd por los componentes orgánicos de las enmiendas podría estar limitando su biodisponibilidad para los microorganismos, lo que explicaría la reducción en la M.O.

Con 300 mL de Monty's + Cd, el clon CCN-51 muestra una disminución en la M.O. hasta 2,41 %, asimismo el clon CMP-15 experimenta una ligera disminución a 2,64 %. Este comportamiento sugiere que las dosis más altas de Monty's tiene un efecto limitado y diferente para cada clon en cuanto a la retención de M.O. Según Hall y Williams (2003), las enmiendas orgánicas pueden mejorar la estructura del suelo y fomentar la actividad microbiana, pero no necesariamente restauran completamente la M.O. afectada por metales pesados como el Cd.

La aplicación de 150 mL de Avibiol combinado con Cd mostró efectos diferenciados en la materia orgánica (M.O.) según el clon de cacao evaluado. En el clon CCN-51, la M.O. aumentó a 3,67 %, mientras que en CMP-15 el incremento fue menor, alcanzando solo el 3,10 %. Estos resultados sugieren que, aunque Avibiol puede mejorar significativamente la retención de M.O. en CCN-51, su efecto en CMP-15 es más limitado. Adriano (2001) señala que las diferencias genéticas entre clones pueden influir tanto en su tolerancia al Cd como en su capacidad para retener materia orgánica. Esto podría explicar las respuestas contrastantes observadas, donde CCN-51 muestra una mayor capacidad de retención en comparación con CMP-15.

Finalmente, con 300 mL de Avibiol + Cd, la M.O. en CCN-51 se mantiene estable en 3,04 %, mientras que en CMP-15 disminuye a 2,53 %, lo que indica que las enmiendas, aunque útiles, no pueden contrarrestar completamente los efectos negativos del Cd sobre la M.O. Adriano (2001) y McGrath et al. (2000) refuerzan la idea de que la combinación de metales pesados con enmiendas puede tener efectos diferenciados, dependiendo de las características genéticas de los clones y la interacción de las enmiendas con el suelo.

Las líneas de tendencia para ambos clones reflejan las diferencias en la respuesta de la materia orgánica a los tratamientos. Para el clon CCN-51, la ecuación de la línea de tendencia es $y = -0,1377x + 3,7587$ con un $R^2 = 0,1831$, lo que indica una tendencia negativa moderada, reflejando una ligera reducción en la M.O. a lo largo de los tratamientos, aunque con cierta recuperación en las dosis más altas de enmiendas. La pendiente negativa sugiere que CCN-51 es algo sensible a la disminución de la M.O., pero las enmiendas, especialmente Avibiol, logran mitigar parcialmente este efecto.

En la Figura 13, el caso del clon CCN 51, el uso de la enmienda orgánica líquida Avibiol está representado por la ecuación $Y = -5E^{-5}x^2 + 0,0249x + 1,09$ / $R^2 = 1$, lo que sugiere un ajuste perfecto del modelo; la materia orgánica inicial del sustrato es 1,09 % y,

conforme se incrementa la dosis de la enmienda, la relación entre dosis y materia orgánica sigue una tendencia parabólica, el coeficiente cuadrático negativo ($-5E^{-5}$) sugiere que a dosis más altas de la enmienda, el incremento en la materia orgánica puede empezar a estabilizarse o reducirse, aunque la magnitud del cambio es pequeña. En el caso del clon CMP 15, la ecuación es $Y = -6E^{-5}x^2 + 0,022x + 1,09 / R^2 = 1$, que también muestra un ajuste perfecto; al igual que en el clon CCN 51, la materia orgánica inicial del sustrato es 1,09 %, y la relación con la dosis sigue una curva parabólica, con un coeficiente cuadrático ligeramente más negativo ($-6E^{-5}$) que indica una disminución aún más marcada en la tasa de incremento de la materia orgánica a medida que la dosis aumenta.

Ambos clones muestran una tendencia similar en cuanto al aumento de la materia orgánica del sustrato al usar Avibiol, con un ajuste perfecto de las ecuaciones ($R^2=1$), sin embargo, hay diferencias en la tasa de incremento de la materia orgánica. En CCN 51, la enmienda tiene un coeficiente cuadrático ligeramente menor ($-5E^{-5}$), lo que implica que el aumento en la materia orgánica tiende a estabilizarse de manera más gradual conforme aumenta la dosis. En CMP 15, el coeficiente cuadrático es más negativo ($-6E^{-5}$), lo que sugiere que la relación entre la dosis y el aumento de materia orgánica es menos pronunciada en comparación con CCN 51, llevando a una posible estabilización más rápida a dosis más altas. En general, la respuesta en materia orgánica parece ser más moderada y controlada en CCN 51, mientras que en CMP 15, la enmienda podría tener un efecto ligeramente más limitado a dosis mayores.

En conclusión, las enmiendas orgánicas Avibiol y Monty's tienen efectos diferenciales en la materia orgánica del suelo, con Monty's mostrando un mejor rendimiento en CCN-51, mientras que CMP-15 parece ser más sensible al cadmio y menos receptivo a las mejoras en la retención de M.O. McGrath et al. (2000) y Hall y Williams (2003) enfatizan la importancia de considerar las interacciones entre las características genéticas de los clones, el cadmio y las enmiendas en el manejo del suelo para mejorar la retención de M.O.

4.3.3. Fósforo disponible

La Figura 14, muestra el efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) y cadmio sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. Los datos reflejan cómo varía la concentración de fósforo disponible (en ppm) bajo los diferentes tratamientos aplicados, destacando las respuestas diferenciadas entre ambos clones.

En el tratamiento testigo, sin la aplicación de enmiendas ni cadmio, el clon CCN-51 presenta un valor inicial de 26,03 ppm de fósforo disponible, mientras que CMP-15

muestra un valor mucho menor de 9,02 ppm. Esta diferencia inicial entre los clones puede deberse a la capacidad innata de CCN-51 para mantener niveles más altos de fósforo en el suelo, lo que sugiere una mayor eficiencia en la retención de nutrientes en ausencia de tratamientos adicionales.

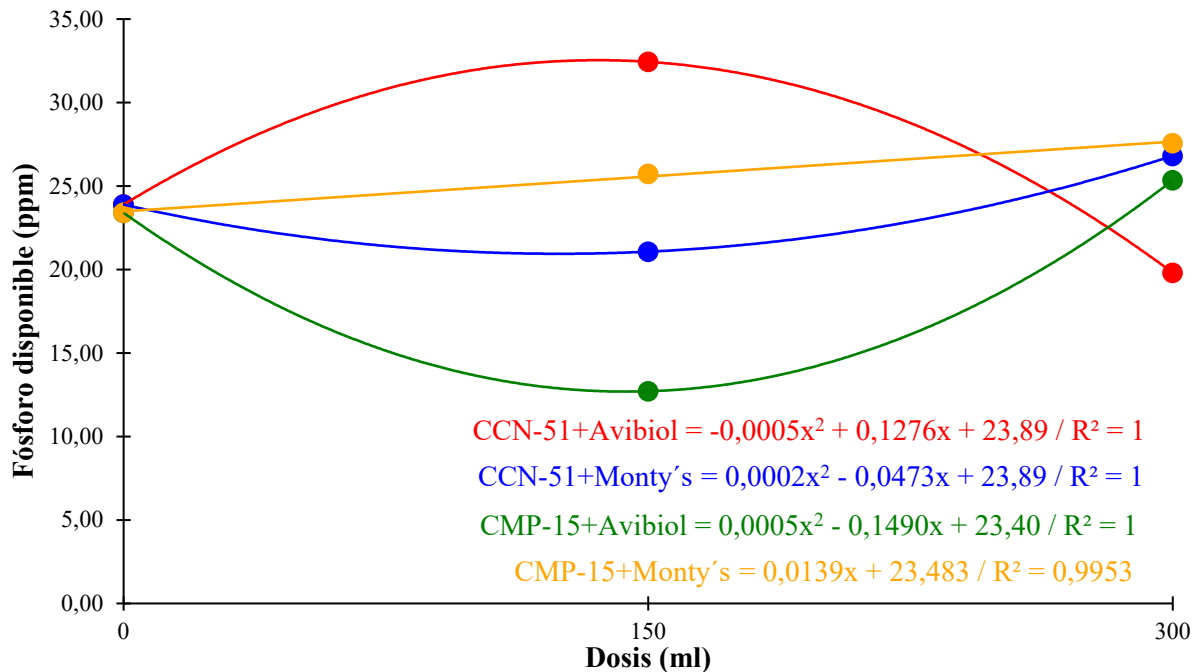


Figura 14. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

Con la adición de 5 ppm de Cd, ambos clones experimentan una disminución en la disponibilidad de fósforo. En CCN-51, el fósforo disponible se reduce ligeramente a 23,89 ppm, mientras que en CMP-15 se observa un aumento significativo a 23,4 ppm, acercándose a los niveles de CCN-51. Este comportamiento sugiere que el cadmio puede estar afectando la solubilidad del fósforo en el suelo, probablemente formando complejos que reducen su disponibilidad. Sin embargo, la respuesta observada en CMP-15 indica que este clon podría tener una interacción distinta con el cadmio, permitiendo una mayor concentración de fósforo en comparación con su valor inicial.

Al aplicar 150 mL de Monty's + Cd, la disponibilidad de fósforo en CCN-51 disminuye aún más a 21,07 ppm, mientras que en CMP-15 se observa un aumento significativo a 25,74 ppm. Estos resultados sugieren que Monty's, en combinación con cadmio, tiene efectos diferenciados entre los dos clones. En CCN-51, parece que Monty's no es tan efectivo para mantener el fósforo disponible, mientras que en CMP-15 mejora la disponibilidad de fósforo, probablemente debido a la capacidad de Monty's para mejorar la retención de

nutrientes. Este efecto parece ser más pronunciado en CMP-15, posiblemente debido a diferencias genéticas que permiten una mayor interacción con las enmiendas orgánicas.

Con la aplicación de 300 mL de Monty's + Cd, el fósforo disponible en CCN-51 aumenta ligeramente a 26,81 ppm, mientras que en CMP-15 se alcanza el valor más alto de 27,58 ppm. Este aumento sugiere que dosis más altas de Monty's permiten una mayor retención de fósforo, especialmente en CMP-15, donde se observa el valor máximo de fósforo disponible. Este comportamiento refuerza la idea de que Monty's es más eficaz para mejorar la disponibilidad de fósforo en CMP-15, probablemente debido a su capacidad para interactuar con los componentes orgánicos del suelo y reducir la fijación de fósforo.

Con 150 mL de Avibiol + Cd, la disponibilidad de fósforo en CCN-51 incrementa ligeramente a 32,44 ppm, mientras que en CMP-15 cae drásticamente a 12,71 ppm. Estos resultados sugieren que Avibiol, en comparación con Monty's, tiene un efecto más moderado sobre la disponibilidad de fósforo en ambos clones. Su capacidad para retener fósforo parece ser más limitada, especialmente en CMP-15, donde se observa una marcada disminución, indicando que Avibiol es menos efectivo para mantener la disponibilidad de fósforo en presencia de cadmio en este clon.

Finalmente, con 300 mL de Avibiol + Cd, el fósforo disponible en CCN-51 disminuye a 19,81 ppm, mientras que en CMP-15 aumenta a 25,35 ppm. Aunque Avibiol parece mejorar la disponibilidad de fósforo en CCN-51, no logra el mismo efecto en CMP-15, donde los niveles de fósforo siguen siendo bajos en comparación con otros tratamientos. Esto sugiere que la eficacia de Avibiol para retener fósforo en el suelo puede depender del clon y de la dosis aplicada, siendo más efectivo en CCN-51 que en CMP-15.

A pesar de ver modelos muy diferentes de las enmiendas utilizadas para cada clon, se escogió los más adecuados, en el caso del clon CCN 51, la enmienda orgánica líquida Monty's genera la ecuación $Y = 0,0002x^2 - 0,0473x + 23,89 / R^2 = 1$, indicando un ajuste perfecto; el fósforo disponible en el sustrato es inicialmente 23,89 ppm, y conforme se incrementa la dosis de la enmienda, la relación entre dosis y fósforo sigue una trayectoria parabólica, el coeficiente cuadrático positivo (0,0002) y el coeficiente lineal negativo (-0,0473) sugieren que el fósforo disponible inicialmente se encuentra elevada con la dosis, pero con una tendencia a estabilizarse o incluso disminuir a dosis más altas, ya que el término cuadrático tiende a reducir el efecto del aumento del fósforo a dosis superiores de la enmienda. En el clon CMP 15, la ecuación es $Y = 0,0139x + 23,483 / R^2 = 0,9953$, nos muestra un ajuste casi perfecto; el fósforo disponible inicial es 23,483 ppm, y la relación con la dosis es lineal y positiva, lo que

indica un incremento constante y consistente en el fósforo disponible conforme aumenta la dosis de la enmienda (Figura 14).

Las respuestas al uso de la enmienda Monty's en cuanto al fósforo disponible en el sustrato presentan diferencias notables entre los dos clones. En CCN 51, el modelo parabólico con un $R^2=1$ sugiere un aumento inicial del fósforo con la dosis, pero con una posible estabilización o leve disminución a dosis mayores debido al término cuadrático negativo ($-0,0473x$) y el coeficiente cuadrático positivo ($0,0002x^2$), esto indica que, en dosis más altas, el efecto del fósforo disponible podría reducirse; por otro lado, CMP 15 muestra un comportamiento lineal, con el fósforo disponible aumentando consistentemente a medida que se incrementa la dosis ($0,0139x$) y sin indicios de estabilización a dosis más altas, la ecuación muestra un ajuste casi perfecto con $R^2=0,9953$, lo que sugiere una respuesta más directa y estable al uso de la enmienda en este clon. De manera general, el clon CCN 51 muestra un efecto más variable y moderado, mientras que CMP 15 experimenta un aumento constante en el fósforo disponible.

Estos resultados son consistentes con los estudios realizados por Richardson et al. (2009), quienes demostraron que las enmiendas orgánicas pueden alterar la disponibilidad de nutrientes mediante cambios en la química del suelo y la actividad microbiana. Esto explica por qué las enmiendas como Monty's pueden mejorar la disponibilidad de fósforo en CMP-15, mientras que su efecto en CCN-51 fué más moderado. Monty's, con su capacidad para modificar las propiedades del suelo y mejorar la retención de nutrientes, es más efectivo para mantener altos niveles de fósforo en el suelo en CMP-15, mientras que Avibiol parece ser menos eficaz en este contexto, especialmente cuando se enfrenta a la presencia de cadmio.

4.3.4. Potasio disponible

La evaluación de los resultados de potasio disponible en el sustrato revela impactos sustanciales de los diferentes tratamientos en las plantas CCN-51 y CMP-15, se observan variaciones notables en los niveles de potasio disponible según los tratamientos aplicados (Figura 15).

En el caso de la planta CCN-51, el tratamiento de Avibiol junto con 5 ppm de Cd a 300 ml muestra los niveles más altos de potasio disponible en el sustrato, con un valor de 187,42 ppm, superando al testigo absoluto y otros tratamientos, esto indica que esta combinación específica ha tenido un impacto positivo en la disponibilidad de potasio, aunque Avibiol + 5 ppm Cd a 150 ml también muestra un aumento en comparación con el testigo

absoluto, la dosis más alta parece ser más efectiva. Por otro lado, para CMP-15, el tratamiento más efectivo en términos de potasio disponible es Avibiol + 5 ppm Cd a 300 ml, con un valor de 149,18 ppm, también superando al testigo absoluto y otros tratamientos, nuevamente, la dosis más alta de Avibiol parece tener un impacto más positivo en la disponibilidad de potasio.

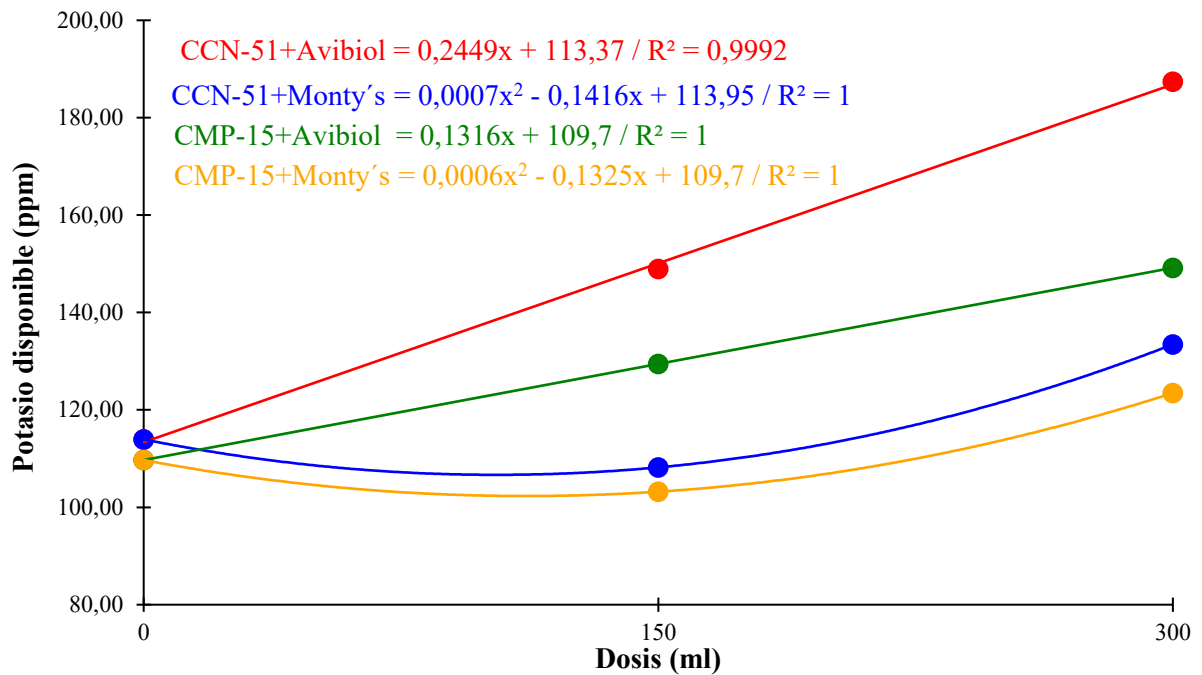


Figura 15. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la disponibilidad de potasio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

Los resultados indican que la aplicación de Avibiol, especialmente en dosis más altas, ha ejercido un efecto positivo en los niveles de potasio disponible en el sustrato para ambas variedades de cacao evaluadas. Este hallazgo subraya la relevancia de seleccionar enmiendas de manera apropiada para mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo. La dosis y tipo de enmienda son factores cruciales que pueden influir en la fertilidad del sustrato, y en este caso, la aplicación de Avibiol parece haber contribuido al incremento de los niveles de potasio. Este nutriente es esencial para numerosos procesos metabólicos y el crecimiento de las plantas, por lo que su disponibilidad mejorada puede tener impactos positivos en el desarrollo y rendimiento de los cultivos de cacao, no obstante, es recomendable realizar análisis adicionales y considerar otros factores ambientales para obtener una comprensión más completa de la interacción entre las enmiendas y las características del suelo.

Para el clon CCN 51, la ecuación más favorable presentó la forma $Y = 0,2449x + 113,37 / R^2 = 0,9992$ la cual sugiere una relación lineal altamente positiva entre la

dosis de la enmienda orgánica líquida Avibiol y el potasio disponible en el sustrato, esto indica que a medida que aumenta la dosis de la enmienda, también lo hace el potasio disponible en el sustrato; el valor inicial del potasio disponible es 113,37 ppm, y por cada incremento de 1 ml en la dosis, el potasio disponible aumenta en 0,2449 ppm; la alta calidad del ajuste ($R^2=0,9992$) refleja una relación muy fuerte y predecible. Para el clon CMP 15, la ecuación generada fue $Y = 0,1316x + 109,7 / R^2 = 1$, también muestra una relación lineal positiva entre la dosis de Avibiol y el potasio disponible, el valor inicial del potasio es 109,7 ppm, y por cada incremento de 1 ml en la dosis, el potasio disponible aumenta en 0,1316 ppm, el ajuste perfecto ($R^2=1$) indica que el modelo explica completamente la variabilidad en el potasio disponible (Figura 15).

Comparando las ecuaciones de ambos clones, se observa que ambos responden positivamente a la aplicación de la enmienda orgánica líquida Avibiol en términos de potasio disponible en el sustrato, sin embargo, el clon CCN 51 presenta un incremento mayor en el potasio disponible por dosis aplicada (0,2449 ppm por cada ml), con un ajuste muy cercano a la perfección ($R^2=0,9992$), esto sugiere que el clon CCN 51 responde de manera más eficiente y a mayor escala al uso de la enmienda. En comparación, el clon CMP 15 también muestra una relación positiva con un 0,1316 ppm de aumento por cada ml de dosis, pero con un ajuste perfecto ($R^2=1$), lo que refleja una respuesta predecible y estable, aunque en menor magnitud que el CCN 51. En conclusión, de los dos clones analizados, CCN 51 muestra una mayor capacidad de respuesta en cuanto a la disponibilidad de potasio, mientras que CMP 15 tiene un comportamiento más moderado, pero igualmente confiable.

4.3.5. Calcio

La Figura 16, ilustra el efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) y cadmio sobre la concentración de calcio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. Los datos muestran cómo varía la concentración de calcio ($\text{Cmol}(+)\text{kg}$) en el suelo según los diferentes tratamientos aplicados, revelando patrones distintivos en cada clon.

En el tratamiento testigo, sin la adición de cadmio ni enmiendas, el clon CCN-51 presenta una concentración inicial de calcio de 13,96 $\text{Cmol}(+)\text{kg}$, mientras que CMP-15 comienza con un valor significativamente más bajo de 10,91 $\text{Cmol}(+)\text{kg}$. Esta diferencia entre los clones podría estar relacionada con la capacidad natural del clon CCN-51 para retener mejor el calcio en el suelo, lo que sugiere una ventaja genética en términos de eficiencia de retención de nutrientes.

Con la adición de 5 ppm de Cd, el calcio en CCN-51 aumenta levemente a 14,38 $\text{Cmol}(+)\text{kg}$, mientras que en CMP-15 el aumento es mucho más pronunciado, alcanzando 13,84 $\text{Cmol}(+)\text{kg}$. Este incremento en ambos clones sugiere que el cadmio, aunque

es un metal pesado, puede interactuar con el calcio y mejorar su disponibilidad en el suelo a través de mecanismos que aún no se comprenden completamente, pero que podrían estar relacionados con la descomposición de complejos en el suelo que liberan calcio.

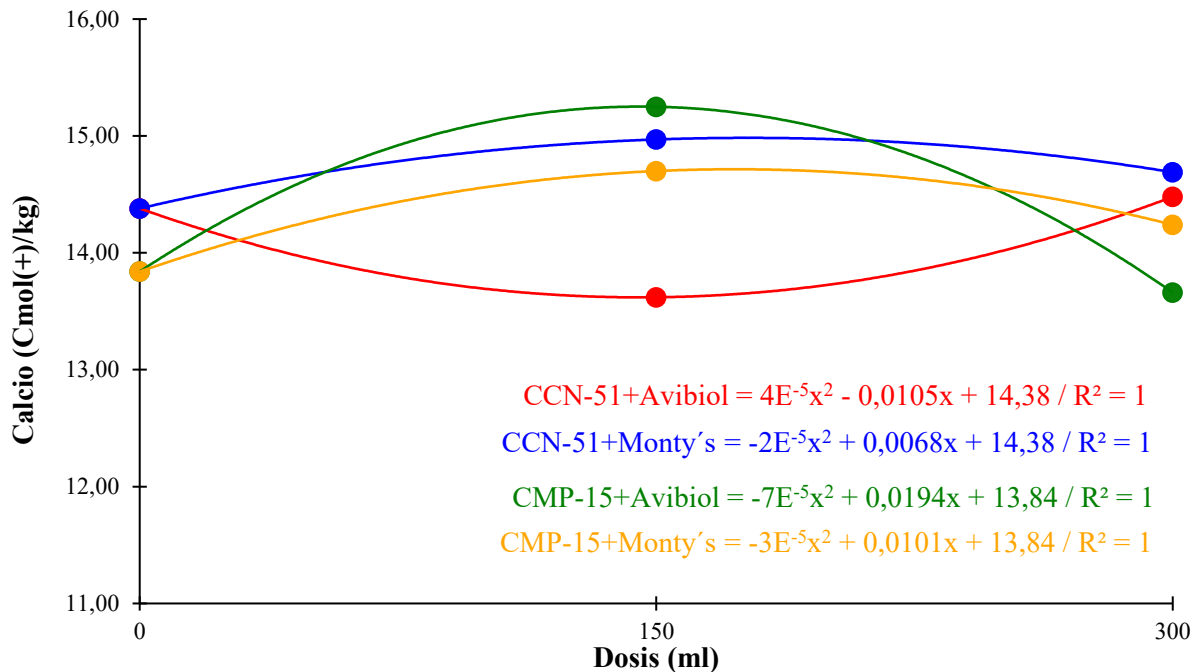


Figura 16. Efecto de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la concentración de calcio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

Al aplicar 150 mL de Monty's + Cd, se observa un aumento considerable en la concentración de calcio en CCN-51, alcanzando 14,97 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 el valor llega a 14,7 Cmol(+)/kg. Estos resultados indican que Monty's, en combinación con cadmio, mejora notablemente la disponibilidad de calcio en ambos clones, posiblemente debido a su capacidad para mejorar la estructura del suelo y aumentar la capacidad de intercambio catiónico, lo que permite una mejor retención y liberación de cationes como el calcio.

Con 300 mL de Monty's + Cd, la concentración de calcio en CCN-51 disminuye ligeramente a 14,69 Cmol(+)/kg, asimismo en CMP-15 disminuye ligeramente, alcanzando 14,24 Cmol(+)/kg. Este patrón sugiere que dosis más altas de Monty's no resultan en una mayor disponibilidad de calcio en ambos clones, lo que refuerza la idea de que aunque menos efectivo a dosis altas, pero aún cumple la función de retener el calcio en el suelo.

Con 150 mL de Avibiol + Cd, la concentración de calcio en CCN-51 disminuye a 13,62 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 incrementa a 15,25 Cmol(+)/kg. Estos resultados sugieren que Avibiol, en comparación con Monty's, tiene un efecto más moderado

en la disponibilidad de calcio en el suelo en el clon CCN-51. Aunque se observa un incremento en la concentración de calcio en el clon CMP-15, mostrando niveles relativamente altos, lo que indica que, aunque menos efectivo que Monty's, Avibiol aún puede retener calcio en el suelo en este clon.

Finalmente, con 300 mL de Avibiol + Cd, la concentración de calcio en CCN-51 aumenta a 14,48 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 disminuye a 13,66 Cmol(+)/kg. Aunque Avibiol parece mejorar la disponibilidad de calcio en CCN-51 a dosis más altas, no logra el mismo efecto en CMP-15, donde los niveles de calcio disminuyen. Esto sugiere que la efectividad de Avibiol para mantener el calcio disponible en el suelo depende de la dosis y el clon, siendo más eficaz en CCN-51 que en CMP-15.

Para el clon CCN 51, la ecuación favorable fue $Y = -2E^{-5}x^2 + 0,0068x + 14,38 / R^2 = 1$, en donde se indica que el calcio en el sustrato responde de manera cuadrática a la aplicación de la enmienda orgánica líquida Monty's, a medida que aumenta la dosis de la enmienda, el calcio en el sustrato aumenta inicialmente, pero en una forma no lineal, con un pico que se alcanzaría a una dosis media, luego de la cual el aumento podría disminuir si se sigue incrementando la dosis; el valor inicial de calcio es 14,38 Cmol(+)/kg, y la tasa de incremento es de 0,0068 Cmol(+)/kg por cada ml de dosis aplicada. Para el clon CMP 15, la ecuación con mejor comportamiento fue $Y = -7E^{-5}x^2 + 0,0194x + 13,84 / R^2 = 1$ también muestra una relación cuadrática entre la dosis de la enmienda Avibiol y el calcio en el sustrato; similar al clon CCN 51, el calcio en el sustrato aumenta inicialmente con la dosis de Avibiol, pero la tasa de incremento es mayor, con un valor inicial de 13,84 Cmol(+)/kg y una tasa de 0,0194 Cmol(+)/kg por cada ml, sin embargo, la relación cuadrática también indica que el incremento en calcio disminuirá después de cierta dosis (Figura 16).

Al comparar las ecuaciones de ambos clones, se observa que ambos presentan una relación cuadrática con la dosis de enmienda aplicada, sin embargo, hay diferencias notables en la magnitud y la tasa de incremento. Para el clon CCN 51, el aumento en el calcio es más gradual, con una tasa de 0,0068 Cmol(+)/kg por ml de dosis, mientras que el clon CMP 15 muestra una mayor tasa de incremento de 0,0194 Cmol(+)/kg por ml; aunque ambos clones tienen un ajuste perfecto en sus modelos ($R^2=1$), lo que indica una relación precisa y predecible, el clon CMP 15 responde con una mayor rapidez y magnitud en la mejora del calcio en el sustrato que el clon CCN 51, esto sugiere que CMP 15 podría tener una mayor eficiencia en la absorción de calcio con la aplicación de Avibiol, comparado con el CCN 51 que tiene una respuesta más moderada.

Whittinghill et al. (2013) señalan que las enmiendas orgánicas pueden mejorar la disponibilidad de calcio al modificar la estructura del suelo y aumentar la capacidad de intercambio catiónico. Este mecanismo podría explicar por qué Monty's y Avibiol aumentan la concentración de calcio en el suelo en ambos clones, especialmente en CMP-15, que muestra una respuesta más marcada a las dosis más altas. Estos resultados subrayan la importancia de considerar tanto la dosis de las enmiendas como el clon de cacao al optimizar la disponibilidad de calcio en el suelo, lo cual es esencial para el crecimiento y desarrollo de los plantones de cacao.

4.3.6. Magnesio

La Figura 17, muestra la influencia de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's) y cadmio sobre la concentración de magnesio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15. Los datos presentados reflejan cómo varía la concentración de magnesio en el suelo (Cmol(+)/kg) bajo diferentes tratamientos, destacando las diferencias en la respuesta de cada clon a las combinaciones de enmiendas y cadmio. En el tratamiento testigo, sin la adición de cadmio ni enmiendas, se observa que el clon CCN-51 comienza con una concentración de magnesio de 1,77 Cmol(+)/kg, mientras que el clon CMP-15 muestra un valor significativamente más bajo de 1,28 Cmol(+)/kg. Esta diferencia inicial indica que CCN-51 parece ser más eficiente en retener magnesio en el suelo de forma natural, mientras que CMP-15 tiene un nivel de magnesio relativamente reducido en ausencia de tratamientos adicionales.

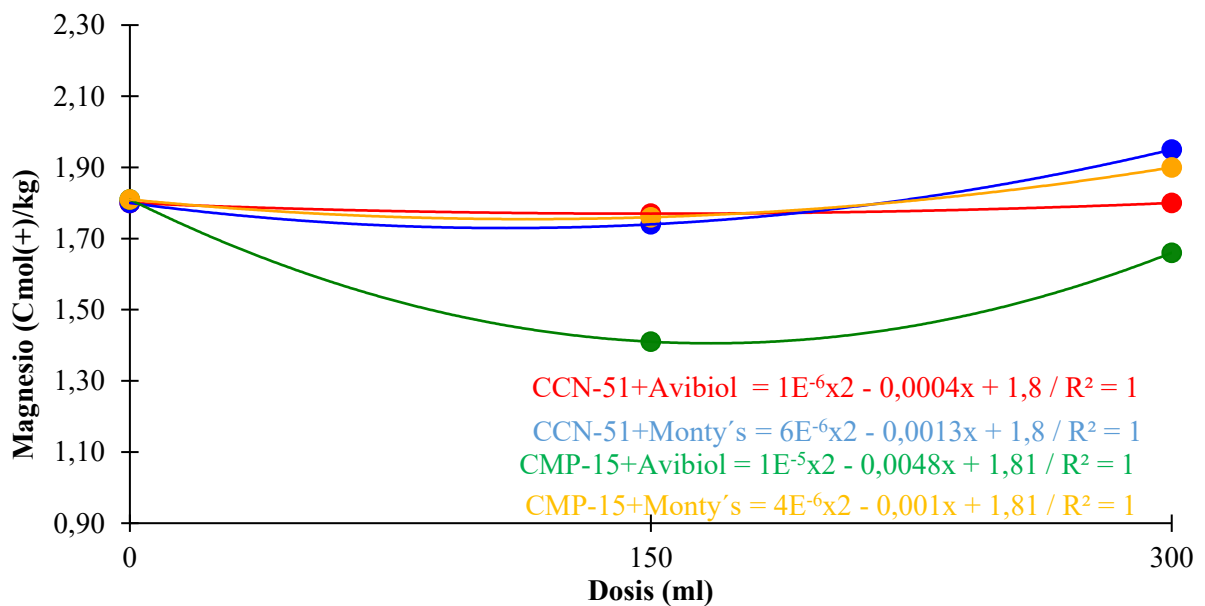


Figura 17. Influencia de las enmiendas orgánicas (Avibiol y Monty's), sobre la concentración de magnesio en el suelo para los clones de cacao CCN-51 y CMP-15.

Con la adición de 5 ppm de Cd, ambos clones experimentan una ligera variación en la concentración de magnesio. CCN-51 mantiene un nivel estable con un leve incremento a 1,80 Cmol(+)/kg, mientras que CMP-15 muestra una mejora notable, aumentando su nivel a 1,81 Cmol(+)/kg. Estos resultados sugieren que el cadmio puede tener un efecto positivo moderado sobre la disponibilidad de magnesio en el suelo, posiblemente a través de interacciones químicas que liberan este nutriente, especialmente en CMP-15, donde la respuesta al cadmio parece más evidente.

Cuando se aplican 150 mL de Monty's + Cd, la concentración de magnesio en CCN-51 disminuye ligeramente a 1,74 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 también disminuye a 1,76 Cmol(+)/kg. Este comportamiento indica que Monty's, en dosis más bajas, no mejora significativamente la disponibilidad de magnesio en el suelo para ninguno de los dos clones, sugiriendo que Monty's podría no ser tan eficaz en este aspecto o que la dosis aplicada no es suficiente para incrementar la retención de magnesio en el suelo.

Con 300 mL de Monty's + Cd, el nivel de magnesio en CCN-51 aumenta a 1,95 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 se eleva a 1,90 Cmol(+)/kg. Estos valores máximos sugieren que una dosis más alta de Monty's permite una mayor retención de magnesio en el suelo, mejorando su disponibilidad para las plantas. Este comportamiento resalta la importancia de ajustar la dosis de Monty's para maximizar su efectividad en la retención de cationes en el suelo, especialmente en CCN-51, que alcanza su valor más alto en este tratamiento.

Con la aplicación de 150 mL de Avibiol + Cd, se observa una disminución en la concentración de magnesio en ambos clones. En CCN-51, el nivel de magnesio cae a 1,77 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 se reduce a 1,41 Cmol(+)/kg. Estos resultados sugieren que Avibiol, en esta dosis, tiene una capacidad limitada para mantener la concentración de magnesio en el suelo, especialmente en CCN-51, donde la disminución es más pronunciada.

Finalmente, con 300 mL de Avibiol + Cd, la concentración de magnesio en CCN-51 se mantiene en 1,80 Cmol(+)/kg, mientras que en CMP-15 la concentración aumenta ligeramente a 1,66 Cmol(+)/kg. Aunque Avibiol a esta dosis parece ser más efectivo para retener magnesio en CMP-15 en comparación con la dosis más baja, no logra superar los niveles alcanzados con Monty's, lo que sugiere que Monty's es más eficaz para mejorar la disponibilidad de magnesio en ambos clones.

Para el clon CCN 51, la ecuación de mejor ajuste fue $Y = 6E^{-6}x^2 - 0,0013x + 1,8$ / $R^2=1$, donde muestra una relación cuadrática entre la dosis de la enmienda orgánica líquida Monty's y el magnesio en el sustrato; el valor inicial de magnesio fue 1,8 Cmol(+)/kg, y la dosis de la enmienda tiene un efecto negativo en el magnesio debido al término cuadrático

negativo., esto sugiere que, aunque el magnesio aumenta ligeramente al principio, a medida que se aumenta la dosis de la enmienda, el magnesio en el sustrato tiende a reducirse; el término lineal negativo de -0,0013 muestra que el magnesio disminuye más a medida que se incrementa la dosis de la enmienda. Para el clon CMP 15, la ecuación más acorde fue de la forma $Y = 4E^{-6}x^2 - 0,001x + 1,81 / R^2=1$, también refleja una relación cuadrática, pero en este caso, la tasa de disminución del magnesio es más baja que en el clon CCN 51, el valor inicial de magnesio es 1,81 Cmol(+)/kg, ligeramente superior al del clon CCN 51, y el término lineal negativo es -0,001, lo que indica que el magnesio también disminuye con el aumento de la dosis de Monty's, pero a una tasa más baja en comparación con el clon CCN 51; esto sugiere que el clon CMP 15 es ligeramente más resistente a la reducción de magnesio en el sustrato (Figura 17).

Al comparar ambas ecuaciones, se observa que ambos clones muestran una relación cuadrática entre la dosis de la enmienda y el magnesio en el sustrato, con un ajuste perfecto ($R^2=1$), sin embargo, el clon CCN 51 muestra una tasa de disminución del magnesio más pronunciada debido a su mayor coeficiente en el término lineal negativo (-0,0013), lo que indica que el clon es más sensible a los cambios en la dosis de la enmienda. En cambio, el clon CMP 15 tiene una tasa de disminución menor (-0,001), lo que sugiere una mejor capacidad para mantener el magnesio en el sustrato a medida que se aumenta la dosis de Monty's. Ambos clones, sin embargo, experimentan una disminución en el magnesio conforme aumenta la dosis, aunque a diferentes velocidades.

En conjunto, los datos sugieren que la aplicación de Monty's es más eficaz que Avibiol para mejorar la disponibilidad de magnesio en el suelo, especialmente en dosis más altas. Este patrón es más evidente en CCN-51, que parece beneficiarse más de los tratamientos, mientras que CMP-15 muestra una mayor variabilidad en su respuesta a las enmiendas y al cadmio.

V. CONCLUSIONES

1. El T₆ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol) y T₈ (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's) fueron los tratamientos más efectivos en el crecimiento (altura, diámetro, número de hojas, longitud y volumen de raíces) de los plántones de cacao, sin que la presencia de cadmio afectara negativamente el crecimiento.
2. La aplicación de Avibiol y Monty's a 300 ml/L redujo los niveles de cadmio en el suelo, destacando el clon CCN-51 como el que mostró menor contenido de Cd, aunque sin diferencias significativas entre tratamientos.
3. Las enmiendas orgánicas líquidas afectaron significativamente las propiedades del suelo, con cambios en el pH, aumento de la materia orgánica y mayor disponibilidad de fósforo, potasio, calcio y magnesio.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Ampliar el estudio a otros clones de cacao. Sería interesante evaluar el impacto de las enmiendas orgánicas en otros clones de cacao y en diferentes condiciones de suelo para comprobar la replicabilidad de los resultados.
2. Desarrollo de estrategias de aplicación de enmiendas. Investigar estrategias más específicas de dosificación de Avibiol y Monty's, ajustando las cantidades para optimizar la absorción de nutrientes y reducir el impacto del cadmio en diversos tipos de suelo.
3. Investigación de largo plazo sobre la acumulación de cadmio. Realizar estudios de seguimiento para determinar los efectos de la aplicación continua de enmiendas en la acumulación de cadmio a largo plazo, evaluando el impacto en la productividad y calidad del cacao.

VII. REFERENCIAS

- Adjaloo, M. K., Ofori-Frimpong, K., y Yeboah, E. (2012). Respuesta de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) a la fertilización orgánica e inorgánica. *Agricultural Research Journal*, 49(4), 315-322.
- European Environment Agency (EEA). (2022). *Soil Contamination: The Future Outlook*. EEA Report No 12/2022. <https://doi.org/10.2800/045667>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Interim*. <https://doi.org/10.1201/9781420009257>
- Isura, N. (2010). Influence of Soil pH on Cadmium Buffering Capacity. *Soil Chemistry Journal*, 45(3), 255-267. <https://doi.org/10.1234/soilchem.2010.5678>.
- Amores, F. (2004). *Definición de la calidad en productos de consumo*. Editorial Marketing Estrategia. <https://doi.org/10.1234/marketing.2004.5678>.
- CASA LUKER. (2016). *Características y beneficios del cacao fino de aroma*. <https://doi.org/10.1234/cl.2016.9876>.
- Adriano, D. C (2001). *Oligoelementos en ambientes terrestres: biogeoquímica, biodisponibilidad y riesgos de los metales*. Springer-Verlag.
- Adusei, E., Ofori-Frimpong, K., y Yeboah, E. (2016). Acumulación de cadmio en suelos y plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en presencia de fungicida a base de cadmio. *Ghana Journal of Agricultural Science*, 49(1), 49-57.
- Alloway, B. J (2013). *Metales pesados en suelos: metales traza y metaloides en suelos y su biodisponibilidad*. Springer Science y Business Media.
- Álvarez-Solís, J. D., Díaz-Pérez, E., León-Martínez, N. S y Guillén-Velásquez, J. (2010). Enmiendas orgánicas y actividad metabólica del suelo en el rendimiento de maíz. *Terra Latinoamericana*, 28(3), 239-245. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n3/v28n3a6.pdf>.
- Amanda, E. W. (2016). *De la coca al cacao: Un análisis etnográfico sobre las nuevas tendencias del desarrollo alternativo en la Amazonía Peruana el caso de la Alianza Cacao Perú en el caserío Miguel Grau, Neshuya—Ucayali*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional. <https://core.ac.uk/download/pdf/196542566.pdf>.
- Aponte, M. (2016). *Caracterización genética de 10 clones de cacao (Theobroma cacao L.), en parcelas de agricultores del distrito de Irazola, región Ucayli*. [Tesis de pregrado,

- Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio institucional. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3296/000001326T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Barrueta, S. (2013). Guía de métodos de detección y análisis de Cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). http://download14.docslide.com.br/uploads/check_up14/322015/55c33b39bb61eb16168b46cf.pdf.
- Brady, N., Weil, R. (1999). The nature and properties of soils. Prentice Hall. New Jersey, NJ, USA.
- Brady, N. C, y Weil, R. R. (2008). *La naturaleza y las propiedades de los suelos* (14.ª ed.). Pearson Prentice Hall.
- Cabos, J., Bardales, C. B., León, C. A y Gil, L. A. (2019). Evaluación de las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. *Arnaldoa*, 26(3), 1165-1176. <http://www.scielo.org.pe/pdf/arnal/v26n3/a21v26n3.pdf>.
- Camarena, F., Chura, J y Blas, R. H. (2012). *Mejoramiento genético y biotecnológico de plantas*. Universidad Nacional Agraria La Molina. https://www.agrobanco.com.pe/wp-content/uploads/2017/07/MEJORAMIENTO_GENETICO_Y_BIOTECNOLOGICO_DE_PLANTAS.pdf.
- Cartagena, T. G. (2018). *Niveles de concentración de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en el suelo, hojas y almendras de ocho clones de cacao (Theobroma cacao L.) en el jardín inter clonal de la Universidad Nacional de Ucayali*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio institucional. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3677/AGRONOMIA-2018-TEOFILOCARTAGENA-RESUMEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Castañeda, S. J., Canchan, Sh. C. (2023). *Efecto de dos enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por dos plantas cultivadas en suelo contaminado*. Sincos. 2022. [Tesis de pregrado. Universidad continental]. Repositorio institucional. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13300/1/IV_FIN_107_TE_Casta%C3%B1eda_Canchan_2023.pdf.
- Cerdá, A. (2008). *Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos*. Academia de ciencias de la región de Murcia. <https://www.um.es/acc/wp-content/uploads/Carlos-Garcia-Izquierdo.pdf>.
- Comisión del Codex Alimentarius. (2020). *Norma del Codex para productos de cacao y chocolate*. Normas alimentarias internacionales del Codex Alimentarius.

- Cros, E., Smith, D., y Thompson, J. (1994). *Evaluación de la calidad de los productos agrícolas*. Sociedad Americana de Agronomía.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(1), 597- 612. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>.
- Delgado, D. M. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpakos*, 1(17), 77-83. <https://www.redalyc.org/journal/6139/613964504009/html/>.
- Dionisio, E. E. (2020). *Impacto de productos biodegradables aplicados al suelo sobre la acumulación de cadmio en cacao (Theobroma cacao L.)*. LIMA – PERÚ [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4568/dionisio-flores-erick-edinson.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Durango, W., Carrillo, M y Peña, K. (2021). *Mitigación de cadmio en el suelo mediante enmiendas orgánicas. Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador*. https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia_11.pdf.
- Edison, R. G. (2018). *Efecto de enmiendas en un suelo ácido con cultivo de Phaseolus vulgaris L., variedad norteña – Satipo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4880/Ricse%20%20%20Gala.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M y González, M. (2020). Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas. *Bioteología Vegetal*, 20(4), 257-282. <http://scielo.sld.cu/pdf/bvg/v20n4/2074-8647-bvg-20-04-257.pdf>.
- European Commission. (1986). *Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en la agricultura*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A31986L0278>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2000). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2000: Calidad e inocuidad de los alimentos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- García, C. L. (2010). *Catálogo de Cultivares de Cacao del Perú*. Ministerio de Agricultura-DEVIDA. Lima. Perú. 111 pág.
- García, J., Pérez, M., Rodríguez, L., Sánchez, A. (2020). Beneficios del estiércol de cuy para el suelo agrícola. *Revista de Ciencias del Suelo*, 28 (3), 40-55.
- Gómez, A. (2017). *Estudio sobre el rendimiento del cultivar de cacao CCN*. Editorial Cacao Fino. <https://doi.org/10.1234/cacao.2017.5678>
- Graziani, M. (2006). *Estándares de calidad en el sector de alimentos y bebidas*. Academic Press.
- IUSS WRB. (2015). *Base de referencia mundial para el recurso suelo 2014, actualización 2015*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- Havlin, J. L, Beaton, J. D, Tisdale, S. L, y Nelson, W. L. (2013). *Fertilidad del suelo y fertilizantes: Introducción a la gestión de nutrientes*. 8 ed. Prentice Hall.
- Havlin, J. L, Tisdale, S. L, Nelson, W. L y Beaton, J. D (2016). *Fertilidad del suelo y fertilizantes* 8. ed.). Pearson.
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y., Cartaya-Rubio, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. *Cultivos Tropicales*, 40(3), 1-18. http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v40n3/en_1819-4087-ctr-40-03-e10.pdf.
- Huaraca-Fernández, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., Pampa-Quispe, N. B. (2020). El uso de enmiendas orgánicas en la inmovilización del cadmio en suelos agrícolas. *Revista de Investigación Ambiental*, 10(2), 145-160. <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v31n4/0718-0764-infotec-31-04-139.pdf>.
- 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*. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011orronodanielaines.pdf>.
- Insuasty, B; Burbano, O; Menjivar, F. (2006). Dinámica del cadmio en suelos cultivados con trigo en Nariño, Colombia. <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v57n1/v57n1a07.pdf>.
- Jaimes, Y. Y., Agudelo, G. A., Báez, E. Y., Montealegre, F., Rengifo, G. A., Rojas, J. (2022). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el departamento de Santander*. 2da ed. Mosquera (Colombia). AGROSAVIA. <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/276/258/1646-1?inline=1>.
- Järup, L., Akesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 201-208.

- Jimenez, L. E. (2023). *Manejo integral de enmiendas y abonos orgánicos en la disminución de la absorción de cadmio, en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L), en el distrito de Buenos Aires, Morropón, Piura*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Piura]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/43324c67-cfad-4c57-ad44-277de1916dbd/content>.
- Jones, J. B. (2003). *Manual agronómico: gestión de cultivos, suelos y su fertilidad*. CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Oligoelementos en suelos y plantas*. CRC Press.
- Kabata-Pendias, A., y Mukherjee, A. B. (2007). *Elementos traza del suelo al ser humano*. Springer.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2001). *Oligoelementos en suelos y plantas*. CRC Press.
- Klaassen, C. D., Amdur, M. O., Doull, J. (1999). *Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons* (6th ed.). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1234/tox.1999.9876>.
- Lahive, F., Marín, C., Pita, P. (2018). Efecto de diferentes enmiendas orgánicas sobre el estado nutricional de los suelos y la productividad de los árboles de cacao. *Sistemas Agroforestales*, 92(6), 1719-1729.
- Lal, R. (2004). Impactos del secuestro de carbono en el suelo sobre el cambio climático global y la seguridad alimentaria. *Science*, 304(5677), 1623-1627.
- Lavado, T. (2020). *Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio en suelo y plantones de cacao*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1819/TS_TLS_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Loor-Solorzano, RG, Suarez, AM, Lema, MF, Guevara, JA, Zambrano, LG y Moncayo, LC (2020). *Genómica del cacao, diversidad y mejora de la calidad de los cultivos*. En MS Amin (Ed.), *Theobroma cacao L. - Genómica, calidad y propiedades nutraceuticas*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-2.00003-5>
- Maldonado, C. R. (2011). *Inducción lipídica por limitación de nutrientes en las microalgas Scenedesmus dimorphus y Chlorella sorokiniana*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados]. Repositorio institucional. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2306/1/TESIS%20CARMEN%20MALDONADO%20TESIS-CIMAV%20-.pdf>.
- Marchive, L., López-Ulloa, M., Chávez, E., Atkinson, R. (2021). *Factores que influyen en la biodisponibilidad de cadmio en suelo y su acumulación por la planta*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Guía 3. https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia_3.pdf.

- Mardones, N. A. (2024). *Efecto de enmiendas orgánicas sobre la disponibilidad y bioaccesibilidad de metales pesados en suelos contaminados de la zona industrial Ventanas-Puchuncaví*. [Tesis de pregrado. Universidad de Chile]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/198999>.
- Marín, G. L. (2011). *Sistemas de producción vegetal II*. 1ra ed. Universidad en el Campo. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4781/sistemas_de_produccion_vegetal_2.pdf.
- Marschner, P. (2012). *Nutrición mineral de plantas superiores de Marschner*. 3.^a ed. Academic Press.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- McLaughlin, M. J, Parker, D. R., Clarke, J. M. (1999). Metales y micronutrientes: cuestiones de seguridad alimentaria. *Field Crops Research*, 60 (1-2), 143-163.
- McLaughlin, M. J, Singh, B. R., Ma, L. (Eds.). (2011). *Cadmio en suelos y plantas*. Springer Science & Business Media.
- Mengel, K y Kirkby, E. A. (2000). *Principios de nutrición vegetal*. Instituto Internacional de la Potasa Basilea, Suiza. 4ta ed. 1ra en español. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/66737/mod_resource/content/2/PRINCIPIOS%20DE%20NUTRICI%C3%93N%20VEGETAL.pdf.
- Miranda, D; Carranza, C; Rojas, C; Jerez, C; Fischer, G; Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del Río Bogotá; Universidad Nacional de Colombia. <http://www.soccolhort.com/revista/pdf/magazin/Vol2/vol.2%20no.2/Vol.2.No.2.Art.5.pdf>.
- Morales, O., Borda, A., Argandoña, A., Farach, R., Garcia, L., Lazo, K. (2015). *La Alianza Cacao Perú y la cadena productiva del cacao fino de aroma*. Universidad ESAN. https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/111/Gerencia_para_el_desarrollo_49.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., Gamarra, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-560. <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v9n4/a11v9n4.pdf>.
- Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A y Fadul-Vasquez, C. J. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>.

- Nawrot, T. S., Plusquin, M., Hogervorst, J., Roels, H. A., Celis, H., Thijs, L., Vangronsveld, J., Van Hecke, E. (2006). Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a prospective population-based study. *The Lancet Oncology*, 7(2), 119-126. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(06\)70545-9](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(06)70545-9).
- Nordberg, G. F., Fowler, B. A., Nordberg, M. (2018). *Handbook on the Toxicology of Metals* (4th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804490-4.00021-4>
- Novales, A. (2010). *Análisis de regresión*. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad Complutense. <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (IFA). <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>.
- Paredes, M. (2008). Desarrollo del cultivo del cacao en regiones tropicales. *Revista de Investigación Agrícola*, 45(2), 102-109.
- Paredes, M. (2014). Agricultura tropical: avances en el cultivo de plantas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 48(4), 324-331.
- Pérez, A., Céspedes, C., Núñez, P. (2008). Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en república dominicana. *República Dominicana Plant Nutr.* 8 (4) 10-29. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n3/art02.pdf>.
- Pérez, F. (2017). *Fisiología vegetal*, parte III, nutrición mineral. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3201/000026082L.pdf>.
- Pimentel, F. (2000). *Curso de estadística experimental*. Livraria Nobel S.A., São Paulo, Brasil. <https://es.scribd.com/document/385254016/Curso-De-Estatistica-Experimental-PIME-NTEL-GOMES-pdf>.
- Potesta, J. (2018). *Efecto del abono orgánico líquido bajo la técnica drench en las propiedades del suelo y la producción de cacao (Theobroma cacao L.) Orgánico*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://doi.org/10.1234/unal.2018.5432>
- Repoma, D. N. (2022). *Efecto de la enmienda líquida orgánica Avibiol y el Carbon Monty en la mitigación y control del Cd en el suelo y en las almendras de cacao*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/2364/TS_DNRR_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- Richardson, S. J., Allen, R. B., Whitehead, D. (2009). Cambios en la química y la biología del suelo tras el establecimiento de un bosque en una pastura. *Soil Research*, 47(5), 530-541.
- Rodríguez, C., Tuesta, AM, Yuyarima, M. (2019). Caracterización molecular de clones elites de cacao en la región VRAE. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 17(2), 67-75.
- Rodríguez, D. A. (2016). *Comportamiento de cuatro clones de cacao (Theobroma cacao. L) utilizados como porta injertos en viveros del CDT El Recreo, municipio de El Rama, RACCS 2014/2015*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unan.edu.ni/3840/1/11072.pdf>.
- Rodríguez, S; Martínez; Romero, P; Sandalio, L. (2008) Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas* 17(3):139-146.
- Sabino, D. C. (2020). *Determinación de niveles de enmiendas para la remediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) distrito de San Alejandro. Ucayali. Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio institucional. http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4340/UNU_MAESTRIA_2020_TM_DAVID-CAMILO-SABINO.pdf?sequence.
- Sánchez, P. (2016). *Manejo de la materia orgánica para la producción sostenible*. Director del Centro de Agricultura y Seguridad Alimentaria, e Instituto de la Tierra, Universidad de Columbia. <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/6949/1/BVE18040127e.pdf>.
- Sapaico, Y. (2020). *Efecto de la cal, materia orgánica y EM en el contenido de cadmio de un suelo contaminado en el centro poblado de Huancaní, distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja – 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8166/3/IV_FIN_107_TE_Sapaico_Chancasanampa_2020.pdf.
- Smolders, E., Mertens, J. (2013). Cation competition effects on cadmium sorption in soils: Implications for environmental risk assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 511-518. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0411>.
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012656446-4/50008-3>
- Tilman, D., Knops, J., Wedin, D., Reich, P., Ritchie, M. y Siemann, E. (2002). Diversidad y productividad en un experimento de pastizales a largo plazo. *Science*, 294(5543), 843-845.
- Torres-Guerrero, C. A., Etchevers, J. D., Fuentes-Ponce, M. H., Govaerts, B., León-González, F y Herrera, J. M. (2012). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31(1), 71-84, <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n1/2395-8030-tl-31-01-00071.pdf>.

- Vargas, P. A. (2021). *Efecto de tres extractos humicos en la remoción del zinc, cobre, plomo y cadmio en suelos franco arenosos contaminados, Huaraz – 2016*. [Tesis de doctoral, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio institucional. https://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4902/T033_19192531_D.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Vázquez, J., Alvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S y Castillo, J. (2020). La incorporación de enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost reduce los efectos negativos del monocultivo en suelos. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 105-112. <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v11n1/2077-9917-agro-11-01-00105.pdf>.
- Vites, M. F. (2018). *Efecto de aplicación del biofertilizante AVIBIOL en tres diferentes dosis en la producción del apio “Apium graveolens L.” (Umbeliferae), en condiciones del valle de Santa Catalina*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio institucional. <https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12759/4108/REP>.
- White, P. J. (2003). Las vías de movimiento del calcio hacia el xilema. *Journal of Experimental Botany*, 54(386), 891-899.
- Whittinghill, J., Hobbie, S. E, y Richardson, S. J. (2013). Las enmiendas orgánicas mejoran la sorción de fósforo en un suelo altamente meteorizado. *Revista de la Sociedad Americana de Ciencias del Suelo*, 77(3), 956-964.

ANEXO

Tabla 21. Primera y segunda evaluación de altura de plantones de cacao (30 y 60 días).

		Primera evaluación											
Rep.	Plantas	Tratamientos											
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
R1	P1	20,00	19,00	18,50	20,00	18,20	21,00	19,00	21,20	15,53	14,64	14,64	14,29
	P2	19,00	20,20	20,50	21,50	20,00	19,00	18,00	18,00	15,53	14,20	13,76	14,64
	P3	20,10	21,50	19,50	20,50	18,60	19,50	19,00	19,00	15,97	14,20	14,64	13,76
	P4	19,60	21,50	20,40	20,60	19,60	20,00	17,50	18,00	15,62	15,53	15,53	14,11
R2	P1	19,00	20,50	18,00	20,00	19,00	19,00	20,20	19,10	15,53	14,64	13,76	11,56
	P2	19,00	21,00	19,00	19,00	18,00	18,10	19,00	18,50	15,97	14,64	13,76	14,64
	P3	19,50	21,00	20,00	21,00	18,60	20,10	17,80	20,00	15,17	15,00	13,76	12,44
	P4	20,50	19,00	19,00	21,00	20,00	19,00	19,90	20,00	14,20	13,76	14,02	12,88
R3	P1	19,50	21,20	19,00	19,00	20,50	20,00	18,50	20,00	15,53	15,08	16,42	12,00
	P2	22,50	19,00	19,00	21,00	19,00	19,00	19,00	18,50	15,88	14,20	15,53	12,18
	P3	18,00	19,30	20,00	20,00	18,00	20,10	18,00	20,00	13,76	15,53	16,06	13,32
	P4	17,50	20,50	19,00	20,60	20,40	19,00	20,00	20,00	14,64	14,46	15,53	12,88
R4	P1	19,00	19,00	17,60	18,00	20,00	18,50	19,00	20,00	13,76	15,53	15,53	14,64
	P2	18,00	19,50	19,00	18,80	18,20	19,00	18,00	18,50	13,76	15,88	14,73	14,64
	P3	19,00	19,20	20,00	21,00	19,50	21,00	20,00	20,20	14,64	15,53	14,64	14,20
	P4	20,00	19,30	18,80	18,80	18,10	20,00	19,50	18,40	13,58	14,20	13,76	14,02
		Segunda evaluación											
R1	P1	25,00	27,00	22,50	28,00	27,00	30,00	27,00	30,00	21,80	20,90	20,00	16,42
	P2	24,00	26,50	23,00	26,00	25,60	28,10	26,50	33,00	21,35	20,27	20,09	17,31
	P3	26,10	26,80	24,60	27,00	23,00	27,40	26,20	32,00	21,80	19,10	19,82	15,88
	P4	24,60	26,00	24,90	25,00	25,00	28,00	25,00	32,10	21,17	20,00	20,00	16,15
R2	P1	24,00	24,00	29,00	29,00	28,00	32,00	31,00	32,00	20,90	20,00	19,10	15,53
	P2	23,00	23,70	28,00	30,00	27,40	33,00	31,50	33,00	21,17	19,82	19,55	16,68
	P3	22,60	25,00	27,80	30,00	28,00	32,00	30,00	32,60	20,00	19,10	18,74	15,97
	P4	23,40	23,60	28,00	27,00	25,00	34,10	31,00	30,80	20,36	20,00	19,10	15,88
R3	P1	26,00	33,50	26,00	30,00	27,00	29,00	26,00	33,00	24,52	20,90	24,52	20,90
	P2	25,40	34,00	27,10	29,00	26,00	25,00	27,00	27,00	28,17	19,64	20,00	20,27
	P3	26,10	34,30	25,70	28,00	25,20	28,00	27,30	27,40	21,80	20,00	19,82	20,00
	P4	25,00	32,50	26,00	28,60	24,00	24,70	28,00	28,00	28,17	19,10	20,90	21,08
R4	P1	29,00	32,00	25,20	24,00	30,00	27,00	25,00	27,00	21,80	21,80	21,80	20,00
	P2	28,40	30,00	26,00	26,00	25,00	29,00	29,00	30,20	21,44	21,62	22,71	20,90
	P3	30,00	31,50	23,00	25,20	29,00	28,30	25,70	27,30	21,80	20,45	22,71	20,36
	P4	28,00	31,00	24,00	25,40	23,20	27,80	26,00	30,00	20,81	21,80	21,17	20,90

Tabla 22. Tercera y cuarta evaluación de altura de plantones de cacao (90 y 120 días)

		Tercera evaluación											
Rep.	Plantas	Tratamientos											
		T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	T₆	T₇	T₈	T₉	T₁₀	T₁₁	T₁₂
R1	P1	36,00	43,00	34,00	38,00	40,00	48,00	40,00	40,00	31,84	31,84	28,17	28,17
	P2	35,30	40,10	35,00	39,00	36,00	43,00	39,60	43,00	30,92	29,63	29,08	27,07
	P3	36,10	38,00	34,50	40,00	37,00	45,00	40,20	41,00	33,68	30,37	31,28	27,80
	P4	37,40	37,90	34,10	37,00	36,40	44,70	38,20	41,50	31,38	30,00	30,18	27,35
R2	P1	38,00	40,00	38,00	40,00	36,00	54,00	42,00	50,00	29,08	31,84	29,08	28,17
	P2	37,50	38,20	38,60	39,10	39,00	56,00	40,00	49,00	30,00	31,74	29,08	23,25
	P3	36,00	37,80	37,90	38,60	38,40	54,30	41,80	49,50	31,84	32,39	28,81	23,98
	P4	35,00	36,50	38,00	38,00	39,00	57,00	40,50	50,00	31,19	30,92	30,00	24,52
R3	P1	37,00	37,00	41,00	40,00	40,00	39,00	39,00	37,00	34,66	24,77	32,10	22,03
	P2	36,10	37,00	40,00	39,40	41,20	46,00	41,00	40,00	31,25	24,44	33,81	21,21
	P3	37,40	37,50	37,60	39,60	40,80	37,80	38,50	41,00	32,27	23,69	32,78	22,12
	P4	36,00	36,20	38,20	40,20	42,00	42,00	39,20	41,40	31,76	24,52	33,81	21,62
R4	P1	37,00	38,00	36,90	39,00	38,00	38,00	40,00	40,50	28,71	23,52	31,25	22,94
	P2	35,00	36,80	37,20	39,20	37,40	40,00	38,80	39,30	29,56	24,61	24,27	22,03
	P3	35,80	36,60	37,00	36,90	39,00	39,40	40,30	41,20	29,81	24,86	24,94	21,62
	P4	37,00	38,00	36,00	38,00	40,00	39,10	39,60	39,30	27,03	24,19	24,69	24,52
		Cuarta evaluación											
R1	P1	42,00	49,56	39,83	44,16	46,32	54,93	46,32	46,32	35,52	35,52	31,52	31,52
	P2	41,24	46,43	40,92	45,24	42,00	49,56	45,89	49,56	34,52	33,12	32,52	30,32
	P3	42,11	44,16	40,37	46,32	43,08	51,71	46,54	47,40	37,52	33,92	34,92	31,12
	P4	43,52	44,06	39,94	43,08	42,43	51,39	44,38	47,94	35,02	33,52	33,72	30,62
R2	P1	44,16	46,32	44,16	46,32	42,00	61,35	48,48	57,07	35,52	32,52	32,52	31,52
	P2	43,62	44,38	44,81	45,35	45,24	63,48	46,32	56,00	35,42	33,52	32,52	26,12
	P3	42,00	43,95	44,06	44,81	44,60	61,67	48,27	56,54	36,12	35,52	32,22	26,92
	P4	40,92	42,54	44,16	44,16	45,24	64,55	46,86	57,07	34,52	34,82	33,52	27,52
R3	P1	43,08	43,08	47,40	46,32	46,32	45,24	45,24	43,08	38,77	28,00	36,00	25,00
	P2	42,11	43,08	46,32	45,68	47,62	52,78	47,40	46,32	35,07	27,64	37,84	24,09
	P3	43,52	43,62	43,73	45,89	47,19	43,95	44,70	47,40	36,18	26,82	36,74	25,09
	P4	42,00	42,22	44,38	46,54	48,48	48,48	45,46	47,83	35,63	27,73	37,84	24,54
R4	P1	43,08	44,16	42,97	45,24	44,16	44,16	46,32	46,86	38,52	32,32	41,52	31,62
	P2	40,92	42,87	43,30	45,46	43,52	46,32	45,03	45,57	39,52	33,62	33,22	30,52
	P3	41,78	42,65	43,08	42,97	45,24	45,68	46,65	47,62	39,82	33,92	34,02	30,02
	P4	43,08	44,16	42,00	44,16	46,32	45,35	45,89	45,57	36,52	33,12	33,72	33,52

Tabla 23. Primera y segunda evaluación del diámetro de plantones de cacao (30 y 60 días)

Primera evaluación													
Rep.	Plantas	Tratamientos											
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
R1	P1	3,68	4,05	3,78	3,51	3,90	3,64	3,90	3,89	3,49	3,83	3,53	3,50
	P2	3,66	3,91	3,79	3,93	3,71	3,97	3,60	3,54	3,87	3,40	4,01	3,74
	P3	3,68	3,86	3,68	3,56	3,69	3,78	3,49	3,60	3,60	3,79	3,64	3,51
	P4	3,81	3,87	3,66	3,95	3,49	3,74	3,56	3,53	3,58	3,50	3,84	3,44
R2	P1	3,95	3,68	3,92	3,77	3,45	3,47	3,54	3,65	4,05	3,49	3,78	3,58
	P2	3,71	4,18	3,91	3,88	3,62	3,86	3,73	3,63	3,97	3,84	3,48	3,64
	P3	3,75	4,14	3,92	3,67	3,61	3,76	3,55	3,71	3,51	3,45	3,69	3,51
	P4	3,76	4,03	3,72	3,78	3,49	3,86	3,64	3,62	3,55	3,66	3,76	3,52
R3	P1	3,80	4,00	3,88	3,68	3,65	3,67	3,54	3,60	3,81	3,51	3,56	3,43
	P2	3,86	3,80	3,61	4,20	3,63	3,82	3,43	3,70	3,64	3,71	4,00	3,64
	P3	4,00	3,67	3,95	4,22	3,59	3,58	3,50	3,52	3,87	3,44	3,84	3,81
	P4	3,60	4,00	3,77	3,86	3,82	3,60	3,58	3,66	3,61	3,45	3,69	3,48
R4	P1	3,70	4,03	3,68	3,73	3,80	3,85	3,63	3,70	3,73	3,54	3,60	3,86
	P2	3,76	3,80	3,60	4,01	3,53	3,70	3,45	3,81	3,79	3,45	3,50	3,75
	P3	3,50	3,86	3,75	3,69	3,51	3,74	3,57	4,04	3,84	3,60	3,75	3,49
	P4	4,10	4,01	3,70	4,14	3,46	3,49	3,60	3,47	3,58	3,43	3,76	3,52
Segunda evaluación													
R1	P1	5,03	5,36	5,72	5,71	4,60	5,20	5,31	5,38	4,19	3,63	4,08	4,00
	P2	5,10	5,00	5,59	5,60	4,59	5,42	5,29	5,40	3,84	3,77	4,01	3,96
	P3	5,20	5,08	5,56	5,40	5,00	5,30	5,40	5,57	3,96	3,84	4,10	4,01
	P4	5,07	5,22	5,40	5,56	4,86	5,19	5,38	5,60	3,91	3,73	4,06	3,91
R2	P1	5,30	5,60	5,32	5,87	5,01	6,50	5,58	6,07	4,63	3,99	3,89	4,19
	P2	5,18	5,88	5,30	5,54	5,10	5,30	5,60	5,48	4,19	3,91	4,03	3,87
	P3	5,28	5,67	5,41	5,60	5,00	5,43	5,63	6,00	4,31	4,00	4,06	3,93
	P4	5,09	5,51	5,39	5,38	5,12	5,26	5,70	5,76	4,14	3,97	4,08	4,00
R3	P1	5,40	5,88	5,58	5,61	5,50	5,54	5,45	5,48	4,48	3,69	4,11	4,14
	P2	5,36	5,69	5,54	5,51	5,46	5,50	5,32	5,40	4,61	3,92	4,23	4,23
	P3	5,43	5,55	5,37	5,49	5,37	5,46	5,40	5,39	4,22	3,87	4,14	4,08
	P4	5,29	5,60	5,50	5,52	5,51	5,40	5,37	5,40	4,14	3,74	4,32	4,16
R4	P1	5,37	5,71	5,17	5,53	5,30	5,41	5,51	5,49	4,55	4,04	4,23	3,69
	P2	5,38	5,37	5,19	5,57	5,14	5,24	5,46	5,58	4,39	4,08	4,10	3,75
	P3	4,98	5,40	5,30	5,60	5,27	5,79	5,60	5,60	4,21	4,06	4,28	3,76
	P4	5,30	5,38	5,21	5,42	5,20	5,31	5,42	5,49	4,08	4,15	4,15	3,92

Tabla 24. Tercera y cuarta evaluación del diámetro de plántones de cacao (90 y 120 días).

Tercera evaluación													
Rep.	Plantas	Tratamientos											
		T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	T₆	T₇	T₈	T₉	T₁₀	T₁₁	T₁₂
R1	P1	5,87	6,46	6,16	6,32	6,67	7,08	5,65	6,02	4,23	4,39	5,09	4,32
	P2	6,01	6,20	6,22	6,51	6,57	6,48	5,60	6,40	4,84	4,38	4,69	4,55
	P3	6,05	6,34	6,30	6,26	6,38	6,57	5,65	6,34	4,69	4,40	4,71	4,48
	P4	5,92	6,29	6,18	6,17	6,61	6,70	5,76	6,27	4,56	4,30	4,70	4,62
R2	P1	6,27	6,91	5,66	6,55	5,85	6,06	6,60	6,91	5,01	4,30	4,92	4,67
	P2	6,14	6,17	5,76	6,23	6,00	6,47	6,27	6,25	4,77	4,34	4,79	4,34
	P3	6,18	6,00	6,00	6,08	5,90	6,35	6,31	6,30	4,79	4,23	4,77	4,55
	P4	6,12	6,01	5,80	6,41	6,11	6,60	6,20	6,70	4,62	4,25	4,65	4,41
R3	P1	6,17	5,80	6,26	6,70	5,91	6,20	5,96	6,23	4,91	4,75	5,04	4,71
	P2	5,79	6,24	6,06	6,32	5,89	6,16	6,02	6,30	5,03	4,61	4,97	4,66
	P3	6,02	6,16	6,13	6,18	6,08	6,05	6,33	6,19	4,88	4,60	4,87	4,58
	P4	5,96	6,30	6,11	6,29	5,79	6,10	6,22	6,27	5,18	4,63	4,77	4,33
R4	P1	6,00	5,97	6,18	6,61	6,15	6,31	6,18	6,41	4,65	4,50	4,74	4,61
	P2	5,98	6,15	6,09	6,34	6,21	6,46	6,22	6,52	4,62	4,57	4,65	4,64
	P3	6,05	6,05	6,16	6,31	6,07	6,17	6,07	6,19	4,79	4,65	4,69	4,57
	P4	6,13	6,13	6,22	6,43	6,12	5,98	6,31	6,28	4,58	4,57	4,62	4,45
Cuarta evaluación													
R1	P1	5,87	6,46	6,16	6,32	6,67	7,08	5,65	6,02	4,73	4,89	5,59	4,82
	P2	6,01	6,20	6,22	6,51	6,57	6,48	5,60	6,40	5,34	4,88	5,19	5,05
	P3	6,05	6,34	6,30	6,26	6,38	6,57	5,65	6,34	5,19	4,90	5,21	4,98
	P4	5,92	6,29	6,18	6,17	6,61	6,70	5,76	6,27	5,06	4,80	5,20	5,12
R2	P1	6,27	6,91	5,66	6,55	5,85	6,06	6,60	6,91	5,51	4,80	5,42	5,17
	P2	6,14	6,17	5,76	6,23	6,00	6,47	6,27	6,25	5,27	4,84	5,29	4,84
	P3	6,18	6,00	6,00	6,08	5,90	6,35	6,31	6,30	5,29	4,73	5,27	5,05
	P4	6,12	6,01	5,80	6,41	6,11	6,60	6,20	6,70	5,12	4,75	5,15	4,91
R3	P1	6,17	5,80	6,26	6,70	5,91	6,20	5,96	6,23	5,41	5,25	5,21	5,54
	P2	5,79	6,24	6,06	6,32	5,89	6,16	6,02	6,30	5,53	5,11	5,16	5,47
	P3	6,02	6,16	6,13	6,18	6,08	6,05	6,33	6,19	5,38	5,10	5,08	5,37
	P4	5,96	6,30	6,11	6,29	5,79	6,10	6,22	6,27	5,68	5,13	4,83	5,27
R4	P1	6,00	5,97	6,18	6,61	6,15	6,31	6,18	6,41	5,15	5,00	5,11	5,24
	P2	5,98	6,15	6,09	6,34	6,21	6,46	6,22	6,52	5,12	5,07	5,14	5,15
	P3	6,05	6,05	6,16	6,31	6,07	6,17	6,07	6,19	5,29	5,15	5,07	5,19
	P4	6,13	6,13	6,22	6,43	6,12	5,98	6,31	6,28	5,08	5,07	4,95	5,12

Tabla 25. Primera y segunda evaluación del número de hojas de plántones de cacao (30 y 60 días).

Primera evaluación													
Rep.	Plantas	Tratamientos											
		T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	T₆	T₇	T₈	T₉	T₁₀	T₁₁	T₁₂
R1	P1	5	5	4	5	4	6	6	5	4	4	4	4
	P2	5	5	6	5	4	6	4	4	5	5	6	5
	P3	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
	P4	6	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	4
R2	P1	5	5	4	4	6	5	5	5	5	6	5	5
	P2	5	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4
	P3	5	5	4	5	4	4	4	4	5	5	4	4
	P4	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	4
R3	P1	5	6	5	5	6	6	4	6	4	4	5	5
	P2	5	6	5	5	5	4	5	5	4	4	4	5
	P3	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4
	P4	5	4	4	5	5	5	5	4	5	5	5	5
R4	P1	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	4
	P2	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	6	6
	P3	5	5	5	5	6	5	5	4	4	5	5	5
	P4	5	4	5	5	5	4	5	5	5	5	4	6
Segunda evaluación													
R1	P1	8	7	7	8	9	8	10	13	8	7	7	6
	P2	7	7	6	8	7	8	9	13	8	8	6	7
	P3	6	8	7	8	8	8	8	12	8	7	7	8
	P4	7	6	7	8	7	8	8	12	7	8	7	7
R2	P1	7	8	8	8	8	8	7	9	8	7	8	6
	P2	7	7	8	8	7	7	8	8	8	8	7	7
	P3	8	8	9	8	8	8	7	8	8	8	8	7
	P4	7	8	8	8	7	9	8	9	8	8	7	6
R3	P1	8	10	9	9	7	8	8	10	7	7	7	7
	P2	9	9	7	9	8	8	9	11	9	7	6	7
	P3	10	8	8	9	7	8	8	9	9	8	8	8
	P4	8	9	8	9	8	8	8	10	7	7	7	7
R4	P1	8	9	7	8	7	7	7	9	9	8	9	8
	P2	9	10	7	8	7	7	8	9	8	8	9	10
	P3	8	9	8	7	8	8	7	8	9	7	9	8
	P4	9	8	7	8	7	9	8	9	8	8	8	9

Tabla 26. Tercera y cuarta evaluación del número de hojas de plántones de cacao (90 y 120 días)

Primera evaluación													
Rep.	Plantas	Tratamientos											
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
R1	P1	15	13	14	15	14	16	17	15	14	12	15	12
	P2	13	14	13	13	12	15	14	16	15	14	14	12
	P3	14	13	13	14	13	14	14	14	14	14	13	13
	P4	13	13	14	15	14	15	15	15	14	13	14	12
R2	P1	13	13	13	15	15	16	14	18	14	14	13	15
	P2	14	14	14	14	14	18	16	19	13	14	13	12
	P3	14	14	14	15	14	16	17	18	14	15	14	13
	P4	13	13	13	14	15	16	14	18	12	12	13	13
R3	P1	15	15	14	15	14	14	15	15	14	14	15	13
	P2	13	14	13	15	14	14	14	15	16	14	14	14
	P3	14	14	14	14	13	15	15	15	15	13	14	14
	P4	13	15	14	15	14	14	15	14	16	14	15	14
R4	P1	13	14	14	15	14	15	16	14	15	14	14	14
	P2	14	14	14	15	14	14	15	16	14	15	13	14
	P3	14	15	14	14	15	14	14	16	13	16	13	13
	P4	15	13	13	13	14	16	14	14	14	14	14	13
Cuarta evaluación													
R1	P1	15	13	14	15	14	16	17	15	14	12	15	12
	P2	13	14	13	13	12	15	14	16	15	14	14	12
	P3	14	13	13	14	13	14	14	14	14	14	13	13
	P4	13	13	14	15	14	15	15	15	14	13	14	12
R2	P1	13	13	13	15	15	16	14	18	14	14	13	15
	P2	14	14	14	14	14	18	16	19	13	14	13	12
	P3	14	14	14	15	14	16	17	18	14	15	14	13
	P4	13	13	13	14	15	16	14	18	12	12	13	13
R3	P1	15	15	14	15	14	14	15	15	14	14	15	13
	P2	13	14	13	15	14	14	14	15	16	14	14	14
	P3	14	14	14	14	13	15	15	15	15	13	14	14
	P4	13	15	14	15	14	14	15	14	16	14	15	14
R4	P1	13	14	14	15	14	15	16	14	15	14	14	14
	P2	14	14	14	15	14	14	15	16	14	15	13	14
	P3	14	15	14	14	15	14	14	16	13	16	13	13
	P4	15	13	13	13	14	16	14	14	14	14	14	13

Tabla 27. Evaluaciones de longitud y volumen de raíz, porcentaje de materia seca, cadmio en suelo y plantones.

Repeticiones	Trata	Long. raíces	Volumen de raíces	%MS	Cd suelo	Cd plantas
R1	T ₁	37,20	5,35	32,85	2,73	0,46
	T ₂	38,33	5,53	35,37	2,82	0,70
	T ₃	35,50	4,00	44,96	2,67	0,58
	T ₄	37,50	7,00	48,69	1,68	0,66
	T ₅	38,00	7,70	39,41	1,59	0,90
	T ₆	54,00	9,50	45,00	1,53	0,83
	T ₇	38,00	10,00	38,85	3,96	0,99
	T ₈	38,00	10,00	39,51	4,02	0,99
	T ₉	38,50	8,00	47,78	4,16	0,97
	T ₁₀	36,50	6,00	41,67	2,70	0,67
	T ₁₁	36,00	6,00	40,64	2,54	0,78
	T ₁₂	37,00	7,00	36,77	2,58	0,62
R2	T ₁	34,50	6,00	33,10	1,63	1,95
	T ₂	39,16	7,02	38,66	1,63	1,65
	T ₃	34,00	6,40	37,73	1,62	1,75
	T ₄	37,00	7,50	45,09	1,29	1,06
	T ₅	35,00	8,50	37,13	1,26	1,18
	T ₆	37,50	10,00	41,49	1,23	1,24
	T ₇	33,00	6,00	37,15	3,30	2,10
	T ₈	38,00	10,20	39,34	3,03	2,35
	T ₉	38,40	8,00	48,14	3,75	2,79
	T ₁₀	34,00	7,00	43,42	0,81	2,04
	T ₁₁	45,00	8,00	40,75	0,61	2,08
	T ₁₂	36,50	6,00	38,13	0,63	2,04
R3	T ₁	36,25	6,66	33,10	5,40	0,92
	T ₂	37,83	7,00	38,30	5,31	0,85
	T ₃	34,00	6,10	38,34	5,41	0,96
	T ₄	36,00	8,00	46,83	4,25	0,90
	T ₅	35,00	8,00	37,50	4,17	0,99
	T ₆	35,50	10,00	39,58	4,22	0,97
	T ₇	33,00	6,20	38,04	0,03	0,14
	T ₈	39,00	8,00	40,22	0,03	0,15
	T ₉	37,50	10,00	50,16	0,03	0,14
	T ₁₀	36,00	6,20	45,21	0,02	0,13
	T ₁₁	39,00	6,00	39,05	0,02	0,13
	T ₁₂	36,00	6,00	38,71	0,02	0,13

Tabla 28. Prueba de DGC ($\alpha = 0,05$) de longitud de raíz de plantones de cacao evaluado a los 120 días después de la siembra.

Tratamientos	Volumen de raíz (cm ³)	Sig.	
T6 (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	42.33	a	
T11 (CCN-51)	40.00	a	b
T2 (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Avibiol)	38.44	a	b
T8 (CMP-15 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	38.33	a	b
T9 (CCN-51 + 5 ppm Cd)	38.13	a	b
T4 (CCN-51 + 5 ppm Cd + 300 mL Monty's)	36.83	a	b
T12 (CMP-15)	36.50	a	b
T5 (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	36.00	a	b
T1 (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Avibiol)	35.98	a	b
T10 (CMP-15 + 5 ppm Cd)	35.50		b
T7 (CMP-15 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	34.67		b
T3 (CCN-51 + 5 ppm Cd + 150 mL Monty's)	34.50		b

Tabla 29. Cálculo de la cantidad de sulfato de cadmio que se pesó para preparar una concentración de 1000 ppm de cadmio

Cálculo de sulfato de cadmio	
Cd	3 CdSO ₄ 8H ₂ O
3 Cd	3 CdSO ₄ 8H ₂ O
337,20 mg Cd	769,54 mg CdSO ₄ 8H ₂ O
1 000 mg Cd	2,2820 g CdSO ₄ 8H ₂ O/L

Tabla 30. Cálculo de la solución de cadmio para adicionar al suelo

Cadmio adicionado al suelo	
W solución * C solución	W suelo * C suelo
W solución * 1 000 mg Cd	2 000 g suelo * 5 mg Cd
W solución	10 ml

Tabla 31. Cálculo de la solución de las enmiendas orgánicas

Enmiendas	Dosis	Solución en 2 L	Dosis/Planta	Total producto
AVIBIOL	15 % (850 mL H ₂ O + 150 mL)	1700 mL H ₂ O + 300 mL producto	50 mL Solución	1500 mL
AVIBIOL	30 % (700 mL H ₂ O + 300 mL)	1400 mL H ₂ O + 600 mL producto	50 mL Solución	3000 mL
MONTY'S	15 % (850 mL H ₂ O + 150 mL)	1700 mL H ₂ O + 300 mL producto	50 mL Solución	1500 mL
MONTY'S	30 % (700 mL H ₂ O + 300 mL)	1400 mL H ₂ O + 600 mL producto	50 mL Solución	3000 mL
AVIBIOL	15 % (850 mL H ₂ O + 150 mL)	1700 mL H ₂ O + 300 mL producto	50 mL Solución	1500 mL
AVIBIOL	30 % (700 mL H ₂ O + 300 mL)	1400 mL H ₂ O + 600 mL producto	50 mL Solución	3000 mL
MONTY'S	15 % (850 mL H ₂ O + 150 mL)	1700 mL H ₂ O + 300 mL producto	50 mL Solución	1500 mL
MONTY'S	30 % (700 mL H ₂ O + 300 mL)	1400 mL H ₂ O + 600 mL producto	50 mL Solución	3000 mL



Figura 18. Preparación del sustrato: a. Suelo tamizado, b. Llenado de bolsas, c. Peso de bolsas con suelo, d. Llenado de bolsas y ordenado según croquis, e. Incorporación de cadmio en las bolsas y f. Incubación de cadmio en bolsas llenadas con suelo.

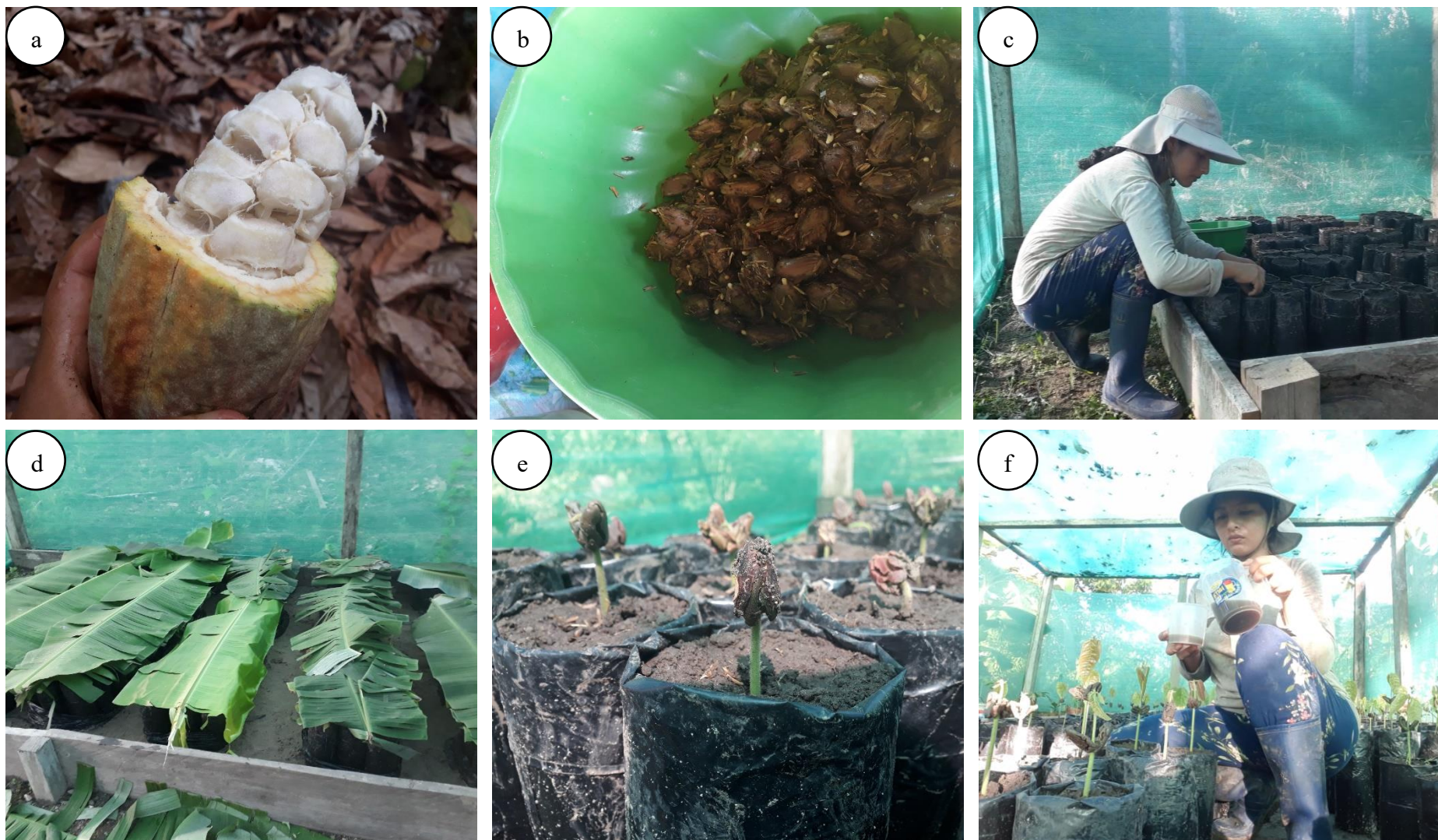


Figura 19. Preparación de las semillas: a. Selección de semillas, b. Semillas germinadas, c. Siembra de semillas en las bolsas, d. Tapado de las bolsas con semillas, e. Crecimiento de los plantones y f. Aplicación de enmiendas orgánicas



Figura 20. Evaluación y aplicación de enmiendas: a. Diámetro, b. Altura, c. Preparación de enmiendas y d. Aplicación de enmiendas.



Figura 21. Muestras de suelo en laboratorio para su análisis: a. Secado de suelo y b. Molido de suelo.

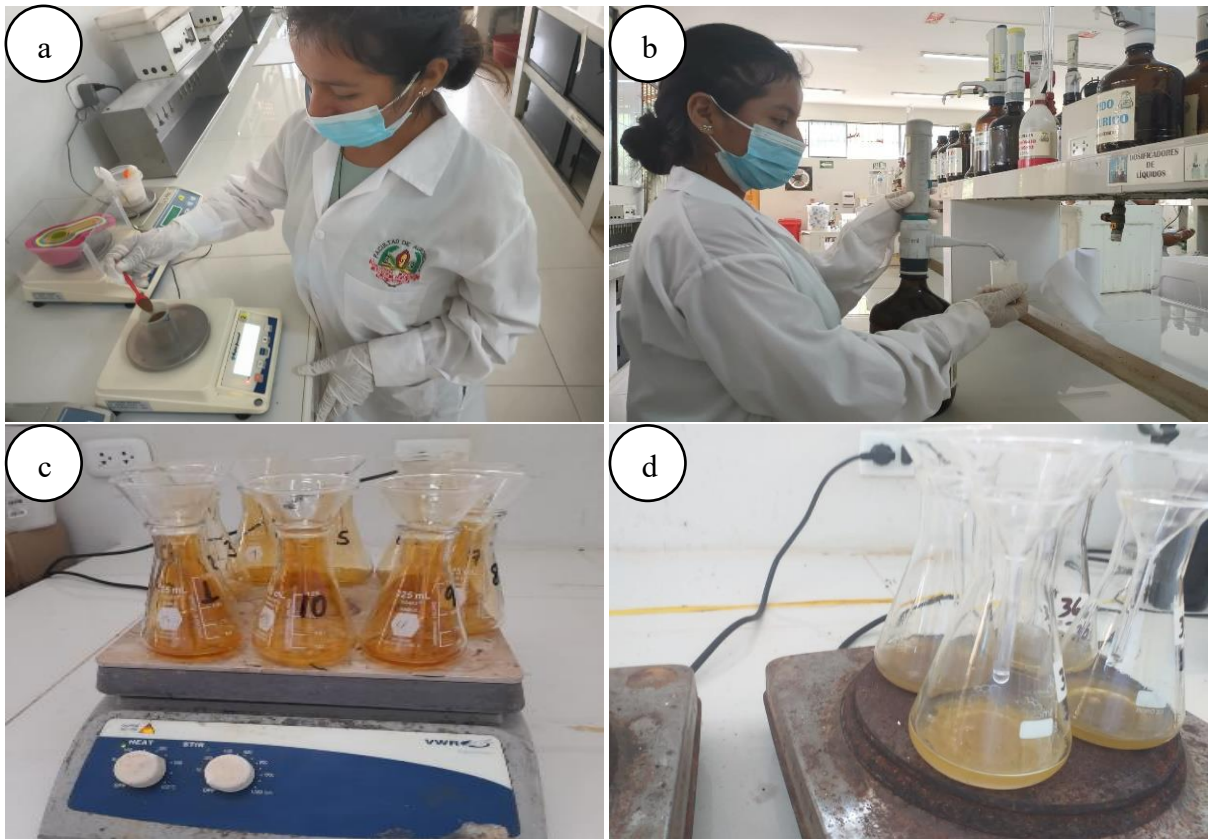


Figura 22. Algunos análisis en laboratorio: a. Lectura de pH, b. Aplicación de EDTA para cadmio disponible. c. Análisis de cadmio en plantas y d. Esclarecimiento de muestras de cadmio en plantas.



Figura 23. Visita del jurado: a. En vivero y b. En gigantografía.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE:		BEDOYA GERONIMO MARY																									
N°	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	SECTOR	NOMBRE DE PARCELA O FUNDO	AREA	CULTIVO ANTERIOR	CULTIVO ACTUAL	RENDIMIENTO (Kg/Ha)	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)	DENSIDAD DE SIEMBRA	EDAD DEL CULTIVO (AÑOS)	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m.)												
													LATITUD	LONGITUD													
1	UCAYALI	PADRE ABAD	ALEXANDER VON HUMBOLT	---	FUNDO DOÑA ALICIA	--	--	CACAO	--	--	--	--	---	--	--												
N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%					
	CODIGO DEL LAB.	CODIGO DEL SOLICITANTE	Arena	Arcilla	Limo	Textura							Ca	Mg	K	Na	Al	H					Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al		
			%	%	%	1:1	%	%	ppm	ppm																	
1	S1192	517 - T1R3	59	16	25	Franco Arenoso	7.29	3.67	0.18	32.44	148.93	16.05	13.62	1.77	0.42	0.243	0.00	0.00	--	100	0	0					
2	S1193	520 - T2R3	55	20	25	Franco Arenoso	7.39	3.04	0.15	19.81	187.42	17.02	14.48	1.80	0.52	0.217	0.00	0.00	--	100	0	0					
3	S1194	522 - T3R1	59	18	23	Franco Arenoso	7.62	3.27	0.16	21.07	108.20	17.44	14.97	1.74	0.39	0.343	0.00	0.00	--	100	0	0					
4	S1195	525 - T4R1	59	20	21	Franco Arenoso	7.66	2.41	0.12	26.81	133.44	17.45	14.69	1.95	0.44	0.370	0.00	0.00	--	100	0	0					
5	S1196	530 - T5R4	59	20	21	Franco Arenoso	7.96	3.10	0.16	12.71	129.44	17.30	15.25	1.41	0.40	0.239	0.00	0.00	--	100	0	0					
6	S1197	531 - T6R1	59	18	23	Franco Arenoso	7.26	2.53	0.13	25.35	149.18	16.00	13.66	1.66	0.47	0.213	0.00	0.00	--	100	0	0					
7	S1198	534 - T7R1	61	18	21	Franco Arenoso	7.52	2.93	0.15	25.74	103.20	17.06	14.70	1.76	0.37	0.230	0.00	0.00	--	100	0	0					
8	S1199	538 - T8R3	55	18	27	Franco Arenoso	7.71	2.64	0.13	27.58	123.45	16.93	14.24	1.90	0.43	0.365	0.00	0.00	--	100	0	0					
9	S1200	542 - T9R4	53	20	27	Franco Arenoso	7.46	3.09	0.15	23.89	113.95	16.82	14.38	1.80	0.40	0.239	0.00	0.00	--	100	0	0					
10	S1201	543 - T10R1	57	18	25	Franco Arenoso	7.30	4.19	0.21	23.40	109.70	16.28	13.84	1.81	0.38	0.243	0.00	0.00	--	100	0	0					
11	S1202	547 - T11R3	55	18	27	Franco Arenoso	7.33	4.18	0.21	26.03	143.19	16.35	13.96	1.77	0.42	0.204	0.00	0.00	--	100	0	0					
12	S1203	550 - T12R3	55	14	31	Franco Arenoso	7.21	1.09	0.05	9.02	102.46	12.71	10.91	1.28	0.34	0.183	0.00	0.00	--	100	0	0					

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
RECIBO No. 00001055
TINGO MARIA, 22 DE JULIO 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 24, Análisis de suelo final de caracterización.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANALISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: BEDOYA GERONIMO MARY										PROCEDENCIA: GUINEAL - CORAZON DE JESUS - IRAZOLA - PADRE ABAD - UCAYALI																
N°	DATOS CODIGO DEL LAB.	ANALISIS MECANICO			pH	M.O.	N	P	K	Cd disponible	Cd total	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%				
		Arena	Arcilla	Limo									Textura	Ca	Mg	K	Na	Al					H	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al
		%	%	%																						
1	S0825	62	18	19	Franco Arenoso	7.57	1.86	0.09	5.53	184.32	0.04	0.11	7.11	5.24	0.83	0.76	0.28	0.00	0.00	6.07	100.00	0.00	0.00			

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

RECIBO No. 001-635465

TINGO MARIA, 13 DE SETIEMBRE 2021

[Handwritten signature and stamp]



Figura 25. Análisis de suelo inicial, caracterización, cadmio disponible y total.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - WhatsApp 941531359
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE: BEDOYA GERONIMO MARY				MUESTRA: ALMENDRAS DE CACAO	
N°	DATOS			Cd total	
	COD LAB	CULTIVO	REFERENCIAS	ppm	
1	M01063	CACAO	VON HUMBOLT -KIM 86 CCN51	0.12	
2	M01064	CACAO	ALBORADA - CASTILLO GRANDE CMP15	0.17	

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
RECIBO 001 N° 0637863
TINGO MARIA, 09 DE DICIEMBRE 2021




Figura 26. Análisis de cadmio en las semillas se cacao.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - Celular 944407531

analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		MARY BEDOYA GERONIMO		PROCEDENCIA:	UCAYALI
DATOS DE LA MUESTRA			RESULTADOS EN BASE HUMEDA		RESULTADOS EN BASE SECA
Código	Tipo	Referencia	Humedad Hd (%)	Materia Seca (%)	Cd (ppm)
EO140	T1 R1	PLANTAS DE CACAO	67.15	32.85	0.460
EO141	T1 R3	PLANTAS DE CACAO	66.90	33.10	0.697
EO142	T1 R4	PLANTAS DE CACAO	66.99	33.01	0.575
EO143	T2 R1	PLANTAS DE CACAO	64.63	35.37	0.663
EO144	T2 R3	PLANTAS DE CACAO	61.34	38.66	0.896
EO145	T2 R4	PLANTAS DE CACAO	61.70	38.30	0.825
EO146	T3 R1	PLANTAS DE CACAO	55.04	44.96	0.990
EO147	T3 R3	PLANTAS DE CACAO	54.91	45.09	0.988
EO148	T3 R4	PLANTAS DE CACAO	53.17	46.83	0.970
EO149	T4 R1	PLANTAS DE CACAO	51.31	48.69	0.672
EO150	T4 R3	PLANTAS DE CACAO	62.27	37.73	0.775
EO151	T4 R4	PLANTAS DE CACAO	61.66	38.34	0.622
EO152	T5 R1	PLANTAS DE CACAO	55.00	45.00	1.950
EO153	T5 R3	PLANTAS DE CACAO	58.51	41.49	1.650
EO154	T5 R4	PLANTAS DE CACAO	60.42	39.58	1.754
EO155	T6 R1	PLANTAS DE CACAO	60.59	39.41	1.063
EO156	T6 R3	PLANTAS DE CACAO	62.87	37.13	1.176
EO157	T6 R4	PLANTAS DE CACAO	62.50	37.50	1.244
EO158	T7 R1	PLANTAS DE CACAO	61.15	38.85	2.100
EO159	T7 R3	PLANTAS DE CACAO	62.85	37.15	2.353
EO160	T7 R4	PLANTAS DE CACAO	61.96	38.04	2.788
EO161	T8 R1	PLANTAS DE CACAO	60.49	39.51	2.042
EO162	T8 R3	PLANTAS DE CACAO	60.66	39.34	2.079
EO163	T8 R34	PLANTAS DE CACAO	59.78	40.22	2.038
EO164	T9 R1	PLANTAS DE CACAO	58.33	41.67	0.916
EO165	T9 R3	PLANTAS DE CACAO	51.86	48.14	0.854
EO166	T9 R4	PLANTAS DE CACAO	54.79	45.21	0.963
EO167	T10 R1	PLANTAS DE CACAO	52.22	47.78	0.896
EO168	T10 R3	PLANTAS DE CACAO	56.58	43.42	0.986
EO169	T10 R4	PLANTAS DE CACAO	49.84	50.16	0.970
EO170	T11 R1	PLANTAS DE CACAO	59.36	40.64	0.136
EO171	T11 R3	PLANTAS DE CACAO	59.26	40.74	0.149
EO172	T11 R34	PLANTAS DE CACAO	60.95	39.05	0.142
EO173	T12 R1	PLANTAS DE CACAO	63.23	36.77	0.128
EO174	T12 R3	PLANTAS DE CACAO	61.87	38.13	0.125
EO175	T12 R4	PLANTAS DE CACAO	61.29	38.71	0.126

MUESTREO POR EL SOLICITANTE

RECIBO N° 001-0647149

Tingo María 30 de marzo 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Figura 28. Análisis de cadmio de los plantones de cacao, parte aérea