

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
MENCIÓN CULTIVOS TROPICALES**



**USO DE ENMIENDAS EN LA REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE
CADMIO EN EL SUELO Y EN LOS GRANOS DEL CACAO**

(Theobroma cacao L.) CLON CCN-51

TESIS

Para optar el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
MENCIÓN: CULTIVOS TROPICALES**

EDILBERTO CÉSAR DÁVILA ZAMORA

TINGO MARÍA – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO
DIRECCIÓN



"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Nro. 032-2019-EPG-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 9:00am, del día jueves 03 de octubre del 2019, reunidos en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

"USO DE ENMIENDAS EN LA REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE CADMIO EN EL SUELO Y EN LOS GRANOS DEL CACAO (*Theobroma cacao* L.) CLON CCN-51"

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias Agrarias, mención Cultivos Tropicales nombre **Edilberto César Dávila Zamora**.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**.

Acto seguido, a horas 11:30am. el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

.....
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLORZANO

Presidente del Jurado

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

Miembro del Jurado

.....
M.Sc. FAUSTO SILVA CARDENAS

Miembro del Jurado

.....
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI

Asesor



DEDICATORIA

- A Dios todopoderoso por darme la vida.
- A mis queridos padres y estimados hermanos por su constante apoyo en toda esta etapa de mi formación profesional.
- A mis queridas hijas, Dámaris y Coraly que son mi motivación e inspiración personal para ser cada día mejor persona.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todo el personal que la conforman, por su apoyo y confianza, en especial a los docentes de la Facultad de Agronomía que contribuyeron en mi formación profesional.
- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, presidente del jurado de tesis por su valiosa colaboración en la revisión y autorización de empaste.
- A los miembros del jurado de tesis: Dr., Ing. M. Sc. Jorge Adriazola del Águila e Ing. M. Sc. Fausto Silva Cárdenas por sus sugerencias y aportes brindados en la redacción del documento final de la tesis.
- Al Dr. Hugo Alfredo Huamaní Yupanqui, asesor de la presente tesis por su apoyo técnico y científico en la ejecución y redacción del presente trabajo.
- A la Cooperativa Agroindustrial Cacao Alto Huallaga (CAICAH), en especial a su gerente general, Jorge Simon Ccollana por las facilidades y el financiamiento brindado a la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	09
II. REVISIÓN DE LITERATURA	11
2.1. EL CACAO CCN-51	11
2.2. METALES PESADOS	12
2.3. ABONO ORGÁNICO.....	34
2.4. ENMIENDAS CÁLCICAS Y MAGNÉSICAS	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1. CAMPO EXPERIMENTAL.....	37
3.2. COMPONENTES EN ESTUDIO.....	39
3.3. TRATAMIENTOS EN ESTUDIO.....	40
3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL	41
3.5. CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO EXPERIMENTAL.....	42
3.6. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO	43
3.7. CUANTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES EVALUADAS	45
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1. CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DEL SUELO.....	52
4.2. CADMIO EN EL SUELO Y GRANO DE CACAO.....	65
4.3. CADMIO EN LA FRACCIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA	71
4.4. CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE EL CADMIO TOTAL DEL GRANO, FRACCIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA CON RESPECTO A LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	83
V. CONCLUSIONES.....	91
VI. RECOMENDACIONES.....	92
VII. RESUMEN	93
VIII. BIBLIOGRAFÍA	95
IX. ANEXO.....	111

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Características que dan prestigio al cultivo de cacao CCN-51.....	11
2. Concentración de metales pesados en rocas expresados en mg/kg ..	13
3. Intervalos usuales para la composición elemental de las sustancias húmicas.....	18
4. Distribución de los grupos funcionales oxigenados en sustancias húmicas (meq/100 g).....	19
5. Categorización de la resistencia a la penetración (penetrómetro de bolsillo).....	25
6. Coeficientes de transferencia de metales pesados del suelo a la planta.....	29
7. Concentraciones de elementos traza para varias especies en tejidos de hojas maduras	30
8. Concentraciones de metales pesados (mg/kg peso seco) en tejidos de hoja generalizados para varias especies vegetales.	30
9. Propuestas de niveles máximos para cadmio en el chocolate y productos derivados de cacao, según la FAO/OMS.	31
10. Niveles máximos admisible de cadmio en el chocolate y derivados de cacao según la Unión Europea (UE).....	32
11. Límites óptimos de detección (LOD) de cadmio de diferentes métodos de análisis.....	32
12. Composición química promedio del compost.....	35
13. Propiedades químicas de la dolomita	36
14. Composición química del magnocal	36
15. Datos meteorológicos registrados durante la ejecución del experimento (marzo 2017 – setiembre 2018).	38
16. Análisis físico-químico del suelo (campo experimental).	39
17. Descripción de los tratamientos en estudio.....	40
18. Esquema del análisis de variancia (ANVA).....	42
19. Cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para resistencia a la penetración del suelo (RPS), pH, materia orgánica	

(M.O), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio más hidrógeno (Al + H) y CIC del suelo.....	63
20. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para resistencia a la penetración del suelo (RPS), pH, materia orgánica (M.O), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio más hidrógeno (Al + H) y CIC del suelo por tratamiento en estudio.....	64
21. Correlación de Pearson entre el cadmio del suelo y cadmio total del grano con respecto a las características químicas del suelo.....	71
22. Cadmio total promedio en la fracción física de la materia orgánica	73
23. Cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para el contenido de cadmio total en la fracción física de la materia orgánica.	75
24. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para cadmio en la fracción física de la materia orgánica, por tratamiento en estudio.....	76
25. Cadmio total promedio en la fracción química de la materia orgánica	80
26. Cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para el contenido de cadmio total en la fracción química de la materia orgánica.....	82
27. Análisis de correlación de Pearson entre el cadmio de la fracción liviana libre, liviana oclusa, pesada, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina con las características químicas del suelo.	86
28. Análisis físico químico del suelo por cada tratamiento en estudio.....	113
29. Cadmio en suelo, fracciones de la materia orgánica y granos de cacao.....	114
30. Cuadrados medios y significación ($\alpha = 0.05$) para cadmio disponible, total en suelo y cadmio en almendras de cacao.	115
31. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para cadmio disponible, cadmio total en suelo y cadmio en almendras de cacao por tratamiento en estudio.....	115
32. Resistencia de penetración al suelo (kg/cm^2) por tratamiento en estudio.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Contaminación de los suelos agrícolas con cadmio.....	15
2. Fuentes ambientales de emisión de cadmio	15
3. Grupos funcionales presentes en las sustancias húmicas	19
4. Representación esquemática de los mecanismos de entrada, secuestro y translocación del cadmio en raíces (CLEMENS, 2006). ..	28
5. Homogenización del grano de cacao.....	46
6. Curva de calibración del equipo.....	48
7. Fraccionamiento densimétrico de la materia orgánica (OTTOS, 2018).	49
8. Fraccionamiento químico de la MOS (OTTOS, 2018).....	51
9. Correlación entre los niveles de dolomita y el pH del suelo.	54
10. Correlación entre los niveles de dolomita y la materia orgánica del suelo.....	55
11. Correlación entre los niveles de dolomita y el fósforo del suelo.	57
12. Correlación entre los niveles de dolomita y el potasio del suelo	58
13. Correlación entre los niveles de dolomita y el calcio del suelo.....	59
14. Correlación entre los niveles de dolomita y el magnesio del suelo	60
15. Correlación entre los niveles de dolomita y el Al + H del suelo	61
16. Correlación entre los niveles de dolomita y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo	62
17. Cadmio disponible y total en el suelo por tratamiento en estudio.....	66
18. Cadmio disponible y total promedio en el suelo	67
19. Cadmio total en el grano de cacao por tratamiento en estudio.	68
20. Cadmio en el suelo y cadmio total en el grano de cacao	70
21. Cadmio total en la fracción física de la materia orgánica.	74
22. Cadmio total en la fracción física de la materia orgánica, en función a los tratamientos en estudio.	77
23. Cadmio total en la fracción química de la materia orgánica.	81
24. Contenido de cadmio en las fracciones de la materia orgánica del suelo.....	83

25.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la fracción pesada y el cadmio total del suelo.	87
26.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el potasio del suelo y el cadmio de los ácidos húmicos.	87
27.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de los ácidos húmicos y el cadmio en la fracción liviana libre.	88
28.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de los ácidos fúlvicos y el cadmio de la fracción liviana libre.	88
29.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la humina y el magnesio.	89
30.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la humina y la CIC del suelo.	89
31.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la humina y los ácidos fúlvicos.	90
32.	Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio del grano de cacao y el cadmio de la fracción liviana libre.	90
33.	Análisis físico-químico inicial del suelo (clave PITEIS-13).	112
34.	Análisis de cadmio total en el grano de cacao.	117
35.	Análisis químico del compost.	118
36.	Análisis químico de la dolomita.	119
37.	Análisis químico del magnocal.	120
38.	Croquis del campo experimental.	121
39.	Croquis de la unidad experimental.	122
40.	Magnocal utilizado en el experimento.	122
41.	Dolomita utilizada en el experimento.	123
42.	Identificación de los tratamientos en campo (tratamiento T0).	123
43.	Verificación de la tesis por el presidente del jurado	124
44.	Forma de muestreo de suelo.	124
45.	Muestreo de suelo.	125
46.	Muestreo del grano de cacao.	125
47.	Secado de los granos de cacao.	126
48.	Fraccionamiento de la materia orgánica.	126

I. INTRODUCCIÓN

La producción de cacao en el Perú es creciente. Las exportaciones peruanas de cacao en grano, especialmente a Europa y los Estados Unidos de Norteamérica en el año 2015 registran 55,828.00 t; año 2016 fueron 57,214.00 t; año 2017 se exportó 53,268.00 t y en el año 2018 exportamos 54,530.00 t; la actividad cacaotera involucra más de tres millones de personas en todo el Perú, en la provincia de Leoncio Prado es uno de los cultivos de mayor importancia económica (AGRODATAPERU, 2016). Actualmente, en la provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, la producción de cacao atraviesa un serio problema, debido a los altos niveles de acumulación de metales pesados en los granos de cacao; registrándose contenidos promedios de cadmio y plomo de 1.53 y 13.69 ppm respectivamente (HUAMANÍ *et al.*, 2016); valores muy por encima de los límites máximos permitidos por la Unión Europea, que establece que el contenido máximo admisible de cadmio en los granos de cacao es de 0.50 ppm (Más y Azcue, 1993; citados por GARCÍA y DORRONSORO, 2002). La producción de cacao orgánico de los socios de la Cooperativa Agroindustrial Cacao Alto Huallaga, no es la excepción; un gran porcentaje (48%) supera los límites permisibles de cadmio; restringiendo la exportación del grano al mercado europeo (GÓMEZ, 2018). La presencia de Cd en los suelos, obedece a causas antropogénicas (uso de fertilizantes fosforados) y naturales (desintegración natural de las rocas); el mal uso de los suelos como disminución del pH, disminución de la (CIC), bajos niveles de materia orgánica; hacen posible que a través del tiempo los metales pesados sean fácilmente asimilados por las plantas como el cacao, acumulándose en sus órganos vegetativos y reproductivos (KABATA-PENDIAS, 2000).

Bajo este contexto se desarrolló el presente trabajo de investigación para contribuir en la solución del problema antes mencionado, enfocándonos básicamente en el uso de enmiendas, orientadas a secuestrar, precipitar y complejar el cadmio en el suelo y de este modo evitar la absorción y acumulación del cadmio en los granos de cacao a un nivel superior de 0.50 ppm.

Objetivo general:

Evaluar el efecto de las enmiendas; compost, dolomita y magnocal en las propiedades fisicoquímicas del suelo y en el contenido de cadmio de los granos de cacao orgánico.

Objetivos específicos:

1. Determinar las características físico químicas del suelo.
2. Cuantificar el cadmio en el suelo y granos de cacao orgánico.
3. Medir el contenido de cadmio total de la fracción física y química de la materia orgánica.
4. Identificar relaciones entre el cadmio total del grano, fracción física y química de la materia orgánica con respecto a las propiedades químicas del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL CACAO CCN-51

2.1.1. ORIGEN

(De Cebra, 2004; citado por SARANGO, 2009) “menciona que el cacao (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 es fruto de varios años de investigación en hibridación de plantas, lo cual fue realizado de forma acertada por el agrónomo Homero Castro Zurita en Naranjal (Guayas, Ecuador), en el año 1965. Cabe señalar que el origen genético de este clon es fruto del cruzamiento entre IMC-67 (Amazónico) x ICS-95 (Trinitario), y la descendencia de estos fue cruzada con otro cacao del oriente que el agrónomo Homero Castro lo colectó y denominó Canelos por el lugar de origen. Por tanto, el cacao CCN-51 viene a ser un híbrido doble”. A continuación, se mencionan algunas características que le han dado tanto prestigio y reconocimiento a este clon:

Cuadro 1. Características que dan prestigio al cultivo de cacao CCN-51.

Granos fermentados	Peso del grano	Porcentaje de humedad para exportación	Porcentaje de cáscara	Porcentaje de manteca	pH	Licor (masa)
> 85 %	> 1.4 g	7%	11% promedio	54% promedio	5 promedio	Color claro

Fuente: De Cebra (2004); citado por SARANGO (2009).

2.1.2. CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS

“Planta de 5 a 6 m de altura, de arquitectura buena. El sistema radicular es fasciculado con 3-4 raíces principales; posee un tallo de donde emergen las ramas (de tres a cinco) a la altura de un metro, con crecimiento lateral que forma la horqueta; las hojas son grandes, de color verde oscuro; sus flores son hermafroditas, es decir, tienen gametos masculinos y femeninos. El fruto es una baya que se conoce como mazorca. Las mazorcas se encuentran distribuidas desde la parte basal hasta la parte superior del árbol, son de color rojo con contenido mediano-alto de mucílago. Generalmente contienen en su interior de 35 a 45 granos de forma aplanada, de 2-4 cm de longitud,

recubiertos por una pulpa dulce y ligeramente ácida. La producción de cacao seco por hectárea en Ecuador es de 23 quintales” (AGAMA, 2005).

“Se ha demostrado que es un material autocompatible que posee una habilidad combinatoria general, lo que significa que posee la facilidad de combinarse con otros materiales genéticos que inclusive pueden ser incompatible. Esta característica unida a una eficiente polinización entomófila se ha demostrado que más del 95% de la polinización y formación de mazorcas en cacao es producto de la polinización realizada por insectos especialmente del género *Forcipomyia* spp, eleva los niveles de producción de fruto, otorgándole ventajas frente a otros materiales genéticos. Estos atributos genéticos junto a la implementación de buenas prácticas de manejo de la plantación, han permitido que este clon exprese en mejor forma su potencial productivo (3 - 4 t/ha)” (INIAP, 2007).

2.2. METALES PESADOS

“El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros” (LUCHO *et al.*, 2005; citado por PRIETO *et al.*, 2009).

“El cadmio es un elemento químico de número atómico 48; masa atómica 112.40 g/mol, densidad relativa 8.65 g/cm³ a 20 °C (68 °F), valencia química 2. Su punto de fusión es 320.9 °C (610 °F) y de ebullición es 765 °C (1410 °F). Es un metal dúctil, de color blanco con un ligero matiz azulado. No se encuentra en estado libre en la naturaleza, y la greenockita (sulfuro de cadmio) es el único mineral de cadmio. Casi todo el cadmio (Cd) que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de zinc, pigmentos de industrias textiles, reciclaje de subproductos a base de hierro y aceites para motores y el uso de fertilizantes agrícolas y pesticidas de diversos usos” (YALÇINKAYA, 2001).

2.2.1. ORIGEN DEL CADMIO EN EL AMBIENTE

A. Fuentes naturales

El cadmio se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, en una concentración media de 0.10 mg/kg. La abundancia de Cd en rocas sedimentarias e ígneas no excede de 0.30 mg/kg y las concentraciones son parecidas en depósitos arcillosos y en rocas metamórficas (Bautista, 1999; citado por SÁNCHEZ, 2016).

“El cadmio es un constituyente muy habitual en casi todos los compuestos de zinc, que pueden llegar a contener un 0.1 - 0.3% de cadmio. También puede encontrarse en minerales de plomo y cobre, si bien en este caso las concentraciones de cadmio son considerablemente más bajas. Uno de los depósitos de zinc más asociado al cadmio es la esfalerita o blenda de zinc (ZnS). Algunos minerales de baja importancia económica que contienen cadmio son el sulfuro de cadmio o greenockita (CdS), el óxido de cadmio (CdO) y el carbonato de cadmio u otavita (CdCO₃)” (Badillo, 1985; citado por SÁNCHEZ, 2016).

La actividad volcánica (incluyendo el vulcanismo subterráneo) es considerada la mayor fuente natural de liberación de cadmio a la atmósfera (SÁNCHEZ, 2016). Las concentraciones de metales pesados en algunas rocas se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Concentración de metales pesados en rocas expresados en mg/kg.

Elementos	Granito	Basalto	Esquistos	Caliza	Arenisca	Suelos
Cd	0.09	0.13	0.22	0.03	0.05	0.35
Co	1.00	35.00	19.00	0.10	0.30	8.00
Cr	4.00	90.00	90.00	11.00	35.00	70.00
Cu	13.00	90.00	39.00	5.50	30.00	30.00
Ni	0.50	150.00	68.00	7.00	9.00	50.00
Pb	24.00	3.00	23.00	5.70	10.00	35.00
Zn	52.00	100.00	120.00	20.00	30.00	90.00

Fuente: FAO (2003); citado por LARIOS (2014).

B. Fuentes antropogénicas

“El cadmio es un elemento no esencial y poco abundante en la corteza terrestre y a bajas concentraciones puede ser tóxico para todos los organismos vivos. La contaminación ambiental por cadmio ha aumentado como consecuencia del incremento de la actividad industrial que ha tenido lugar a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, afectando de forma progresiva a los diferentes ecosistemas terrestres” (PINTO *et al.*, 2004).

Entre los factores antropogénicos más importantes de contaminación de cadmio, caben destacar los siguientes:

- “Emisiones atmosféricas. Se originan a partir de las minas metalúrgicas, ya que el cadmio se extrae como subproducto del Pb, Zn, Cu y otros metales, las incineradoras municipales, y emisiones industriales procedentes de la producción de pigmentos para cristales, anticorrosivos, baterías de Ni/Cd, e insecticidas” (PINTO *et al.*, 2004)

- Depósitos directos. El uso de fertilizantes fosfatados es la principal fuente de contaminación de Cd en suelos agrícolas. Otra fuente de Cd la constituyen los fangos procedentes de aguas residuales que se utilizan en agricultura.

- Contaminación accidental. Ocurre eventualmente debido a la contaminación de tierras por procesos industriales, residuos de la minería y corrosión de estructuras galvanizadas producidas por las industrias (RODRÍGUEZ *et al.*, 2008).

(SMOLDERS y SIX, 2013) mencionan que la contaminación de los suelos agrícolas con cadmio, proviene principalmente de los fertilizantes fosfatados 61%, deposición atmosférica 27%, enmiendas calcáreas 7%, lodos residuales 4% y abonos orgánicos como estiércol 1%; tal como se puede ver en la Figura 1.

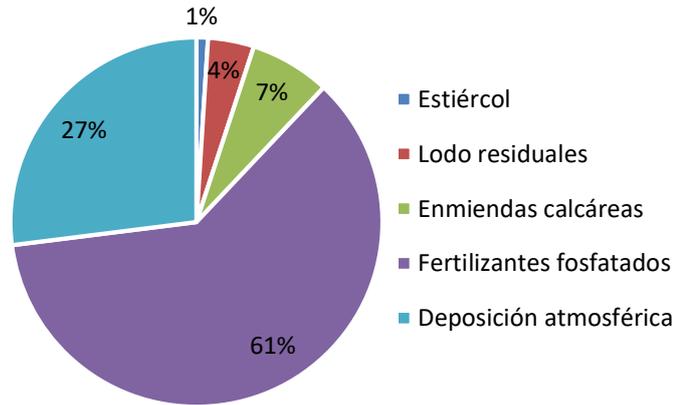


Figura 1. Contaminación de los suelos agrícolas con cadmio (SMOLDERS y SIX, 2013).

En general, la contribución relativa de las diferentes fuentes ambientales de emisión de cadmio, a la exposición del hombre, se muestran en la Figura 2.

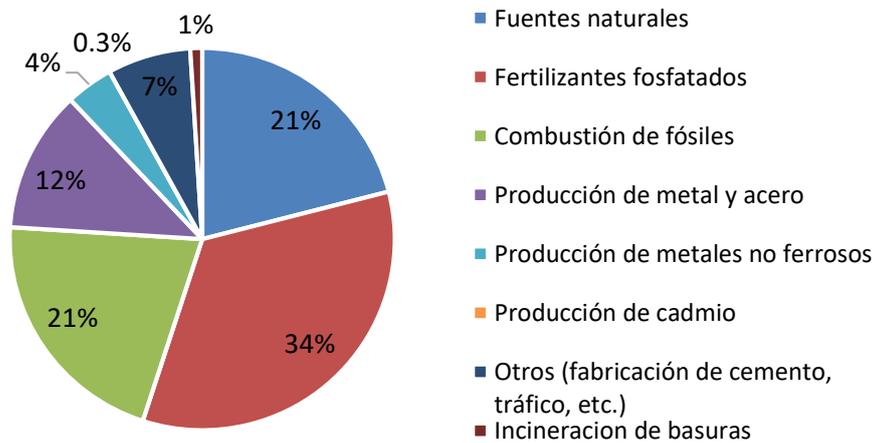


Figura 2. Fuentes ambientales de emisión de cadmio (RODRÍGUEZ, 2007).

2.2.2. FACTORES DEL SUELO QUE INFLUYEN EN LA DISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS

A. Condiciones redox

“El potencial de óxido-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido y afecta su solubilidad” (Yaron *et al.*, 1996; citado por CALLIRGOS, 2014). “En ambientes reductores

como suelos anegados se reduce la biodisponibilidad del cadmio debido a la formación de sulfuro de cadmio (CdS)” (Xiong y Lu, 1993; citado por SÁNCHEZ, 2016). “Cuando los sulfatos (SO_4^{2-}), se reducen a sulfuros (S^{2-}), la tendencia es producir la precipitación de los metales (CdS, CuS, MnS, FeS_2 , ZnS, HgS)” (CORDOBA, 2012).

B. Potencial de hidrógeno

“Es un factor esencial, porque la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, que se movilizan a pH alcalino. El pH del suelo tiene un efecto sobre la biodisponibilidad de la mayoría de los metales pesados al afectar el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad, adsorción e intercambio de iones en el suelo. Además, afecta los procesos de ingreso del metal a las raíces de las plantas” (LAMB *et al.*, 2009).

“En suelos ácidos, se produce una competencia de los iones de H^+ con los cationes metálicos por los sitios de intercambio (ARAO *et al.*, 2010). A pH bajo se produce desorción de los metales pesados, aumentando su concentración en la solución del suelo y su biodisponibilidad (PIOTROWSKA, 1997). Al aumentar el pH los metales pesados son removidos de la solución suelo y adsorbidos por los coloides del suelo, disminuyendo su biodisponibilidad” (PINAMONTI *et al.*, 1997).

“El pH del suelo también afecta la carga eléctrica de los componentes de la fracción coloidal del suelo (menores a 2 micras), constituida por las arcillas, óxidos y materia orgánica humificada que poseen carga dependiente del pH, la cual se hace más negativa a pH alcalino y más positiva a pH ácido” (QUINTERO, 2004).

C. Materia orgánica

“La materia orgánica del suelo (MOS) incluye todo lo vivo e inerte que contiene carbono orgánico. De forma genérica se distinguen tres formas principales de MOS): i) los restos vegetales y animales en fase de descomposición microbiana (1 - 10%), que se encuentran en forma libre en el

suelo o débilmente asociada a la fracción mineral mediante enlaces lábiles de naturaleza predominantemente física, ii) las sustancias no húmicas (10 - 40%), que son compuestos orgánicos clasificables en categorías bioquímicas conocidas, como polisacáridos, ligninas, polímeros lipídicos, proteínas, resinas, pigmentos, etc., que son en su mayoría de origen vegetal, aunque también pueden ser productos de síntesis de la comunidad microbiana, de la que son la principal fuente de energía, y iii) las sustancias húmicas (SH) (40-60 %), que constituyen el principal reservorio de carbono en los suelos” (SALES, 2006).

Sustancias húmicas. Este tipo de sustancias se caracterizan por su extrema e irregular estructura química, Se clasifican de acuerdo con su solubilidad en ácidos y bases, así:

- Humina (HUM). Material completamente insoluble tanto en medio ácido como en básico, reducida capacidad de reacción, por lo general esta fracción es de color negro (RIBES, 2002). La humina presenta baja acidez en comparación con los AF y AH, que, junto con la fuerte asociación a los minerales, provoca insolubilidad en el medio alcalino acuoso. La insolubilidad de la humina puede ser proveniente de haber sido fuertemente adsorbida o unida a los componentes inorgánicos del suelo. La resistencia a la degradación microbiana de materiales húmicos también parece ser en gran parte debido a la formación de complejos metálicos y/o arcilla-orgánicas estables (BENITES *et al.*, 2003). La estructura química y propiedades de la fracción HUM parecen ser similares aquellas de los AH (STEVENSON, 1994; citado por OLIVER, 2009).

- Ácidos húmicos (AH). Constituyen la fracción de sustancias húmicas insoluble en medio ácido ($\text{pH} < 2$) pero soluble en medio básico. Los ácidos húmicos constituyen la mayor fracción extractable de las sustancias húmicas; son menos ácidos (acidez de 400 - 870 meq/100 g) y tienen mayor peso molecular que los ácidos fúlvicos. Presentan colores de café oscuro a negro. “Suelen ser compuestos aromáticos (20 – 60%) y estructuras alquílicas lineales (10 – 40%). Presentan un extenso dominio O-alquílico poco conocido. Suelen ser de carácter anfótero. Sus radicales suelen ser grupos carboxilo, hidroxilo y quinonas, normalmente estables” (PÉREZ, 2009).

- Ácidos fúlvicos (AF). Constituyen la fracción de sustancias húmicas solubles en medio ácido y básico, razón por la que son extraídos después de remover los ácidos húmicos por acidificación. Los ácidos fúlvicos (AF) son una fracción de la materia orgánica del suelo caracterizado por su solubilidad en solución álcali (base) y ácido, los AF son una mezcla de ácidos orgánicos alifáticos débiles y aromáticos con pesos moleculares que van desde 1000 a 10000 Da (RODRÍGUEZ, 2009). “Los AF contienen oxígeno dos veces mayor que los ácidos húmicos, contienen más grupos carboxílicos (-COOH) e hidroxilos (-COH), generando un compuesto químicamente más reactivo, con doble CIC (capacidad de intercambio aniónico y catiónico) que el AH, además la alta CIC es producido por los grupos carboxilos. Los ácidos fúlvicos están compuestos por ácidos carboxílicos y fenólicos que les confieren características de mayor reactividad, tienen mayor solubilidad y movilidad por su menor peso molecular, los ácidos fúlvicos tienen menor agregación y estabilidad” (RON, 2004).

Las sustancias húmicas, especialmente los ácidos húmicos y fúlvicos, están constituidos fundamentalmente por carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y fósforo (P); tal como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Intervalos usuales para la composición elemental de las sustancias húmicas.

Elementos	Ácidos húmicos (%)	Ácidos fúlvicos (%)
C	53.80 - 58.70	40.70 - 50.60
O	32.80 - 38.30	39.70 - 49.80
H	3.20 - 6.20	3.80 - 7.00
N	0.80 - 4.30	0.90 - 3.30
S	0.10 - 1.50	0.10 - 3.60
P	0.10 - 1.00	0.10 - 1.00

Fuente: STEELINK (1985); citado por OLIVER (2009).

Los grupos funcionales presentes en las sustancias húmicas son: quinónicos, cetónicos, alcohólicos, carbonílicos, aminos, amida, etc., tal como se muestra en la Figura 3 (STEVENSON, 1994; citado por OLIVER, 2009).

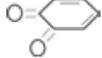
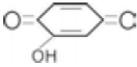
Amino	-NH ₂	Ester	R-COOR'
Amina	R-CH ₂ -NH ₂	Imino	=NH
Amida	R-CO-NH ₂	Péptido	R-CH(NH ₂)-NH-CH(COOH)-R
Alcohol	R-CH ₂ -OH	Anhídrido	R-CO-O-CO-R'
Aldehído	R-CHO	Imina	R-CHNH
Carboxilo	R-COOH		
Carboxilato	R-COO ⁻	Quinona	
Enol	R-CH=CH-OH		
Cetona	R-CO-R'	Hidroxiquinona	
Ceto-ácido	R-CO-COOH		
Carbonilo	-CH=CH-CHO		
Eter	R-CH ₂ -O-CH ₂ -R'		

Figura 3. Grupos funcionales presentes en las sustancias húmicas (STEVENSON, 1994; citado por OLIVER, 2009).

“La habilidad de los ácidos húmicos y fúlvicos para formar complejos estables con iones metálicos se basa en su alto contenido de grupos funcionales donores de electrones, en particular, -COOH, y -OH fenólicos, también -OCH₃, -NH₂, =N, -SH y C=O” (REYES y BARRETO, 2011).

Cuadro 4. Distribución de grupos funcionales oxigenados en sustancias húmicas (meq/100 g).

Grupos funcionales	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos
Acidez total	560 - 890	640 - 1420
COOH	150 - 570	520 - 1120
OH ácidos	210 - 570	30 - 570
OH alcohólicos y débilmente ácidos	20 - 490	260 - 950
C=O cetónicos y quinónicos	30 - 140	120 - 420
OCH ₃	30 - 80	30 - 120

Fuente: STEVENSON (1994); citado por OLIVER (2009).

“Los ácidos fúlvicos tienen un carácter más ácido que los húmicos por contener más grupos funcionales carboxílicos y alcohólicos (Cuadro 4); en los ácidos fúlvicos el 50% de los grupos carboxílicos se disocian a un pH = 3.5, en los húmicos se disocian sólo a pH = 6.0” (REYES y BARRETO, 2011).

Fraccionamiento físico-densimétrico de la materia orgánica.

“A partir del fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo, ha sido factible definidas las fracciones de materia orgánica que están directamente relacionadas con el ciclado de nutrientes. Este método incluye técnicas de separación por tamaño y/o densidad y evita cambios químicos de la MOS. Estas técnicas pueden ser menos destructivas y más selectivas, y los resultados obtenidos de las fracciones de suelo físicamente separadas pueden estar relacionados más directamente con la estructura y función de la materia orgánica y de los ecosistemas y agroecosistemas. El fraccionamiento de tamaño se basa en que la MOS, en la fracción del tamaño de las arenas (> 53 µm), la cual recibe el nombre de materia orgánica particulada (POM), es por lo general más lábil que la materia orgánica asociada a las partículas de limo y arcilla. Mientras que el fraccionamiento de densidad se fundamenta en que durante la humificación parte de la materia orgánica se asocia más con la fracción mineral y, por lo tanto, ocurre la formación de complejos orgánico-minerales de alta densidad” (ROSCOE y OLIVEIRA, 2002).

Fracción liviana libre (FLL). La fracción liviana libre se compone de materiales orgánicos derivados principalmente de restos de plantas, pero que contiene una cantidad razonable de residuos microbianos, incluyendo hifas de hongos, esporas, esqueletos, bolitas fecales, fragmentos de raíces y semillas (GOLCHIN, 1997). La FLL es sólo una pequeña parte de la masa total del suelo mineral, pero pueden almacenar una porción significativa de C y N total. Mientras que la masa de suelo representada por la fracción libre varía entre 0.4% - 6.7% en peso, la cantidad de C presente en esta fracción puede llegar a valores superiores a un tercio de C muestra total. En cuanto al tipo de clima, no hay una clara tendencia a la acumulación de C orgánico en la fracción libre. Sin embargo, los niveles tienden a ser más altos para los suelos

con vegetación nativa, especialmente bosques, pastos cultivados tienden a mantener las cantidades de FLL, mientras que las áreas con cultivos anuales sufren fuertes reducciones en comparación con las áreas nativas. El sistema de labranza, en comparación con labranza convencional, puede mantener los valores más altos de FLL, aunque en algunos estudios no hay diferencia entre estos métodos de manejo del suelo (CHRISTENSEN, 2000).

Fracción liviana ocluida (FLO). Esta fracción comprende un grupo diverso de compuestos orgánicos, incluidos los restos de plantas, estructuras fecales, polen, cutícula de insectos y estructuras de la raíz y hongos con un tamaño reducido y un grado de descomposición más avanzado en comparación con la fracción liviana libre (CHRISTENSEN, 2000). En suelos donde se practicó el roso o la quema no observaron cantidades significativas de materiales orgánicos adecuados, pero si presencia de materiales carbonizados en la fracción liviana oclusa (SCHMIDT y NOACK, 2000). “La materia orgánica ocluida en agregados esta físicamente protegida contra la descomposición por la inaccesibilidad de los microorganismos y sus enzimas, por la reducción de la difusión de las enzimas al espacio interno del agregado y a causa de la dificultad en la difusión del oxígeno que a su vez provoca la disminución de la descomposición aerobia” (VON LUTZOW *et al.*, 2006; citado por MUÑOZ, 2016).

Fracción pesada (FP). Este tipo de fracción se compone de materiales orgánicos en avanzado estado de descomposición, no identificable visualmente, fuertemente ligada fracción mineral (CHRISTENSEN, 2000). Se cree que esta fracción está dominada, por los compuestos orgánicos de alta recalcitrancia, como remanentes de la cutina y suberina, por lo como material resistente, sintetizada por microorganismos durante el proceso de descomposición (BALDOCK *et al.* 1992). Aunque los materiales carbonizados característicamente presentan bajas densidades, han sugerido su presencia en la FP (SCHMIDT y NOACK, 2000), lo que haría posible si estuvieran conectados a las partículas minerales, aumentando su densidad. (BALDOCK *et al.*, 1992) señalan también la posibilidad de cantidades significativas de material poco recalcitrante y recientes (como polisacárido fuente microbiana) a

que se adhieran a la superficie de la arcilla. La fracción pesada se concentra la mayor parte del C orgánico del suelo, y responsable, en la mayoría de los casos, más del 90% del total de carbono (CHRISTENSEN, 2000). Sin embargo, el C en la fracción pesada puede ser primario, recalcitrante o material recientemente depositado por la microbiota, adherido a su superficie (BALDOCK *et al.*, 1992).

D. Conductividad eléctrica (CE)

“El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos. Primeramente, los cationes Na^+ y K^+ pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico. En una segunda fase, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg” (GALÁN, 2000).

E. Contenido y tipo de arcilla

“La mayor parte de las arcillas se caracterizan por tener cargas eléctricas principalmente negativas en su superficie. Estas cargas son responsables de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, constituyen un freno al movimiento de los cationes metálicos en la solución del suelo, hacen que los metales permanezcan por más tiempo en el suelo y disminuyan su solubilidad y biodisponibilidad” (KABATA-PENDIAS, 2000).

“La importancia de los minerales de la arcilla como adsorbentes es secundaria cuando en un suelo existe abundante materia orgánica y/o oxihidróxidos de hierro, componentes más competitivos” (GALÁN, 2000).

La ionización de los grupos funcionales; que ocurre en las arcillas 1:1, debido a la ruptura de las uniones Si-O-Si y Al-O-Al, generando carga negativa a valores de pH superiores a 5 – 6 (GREENLAND y HAYES, 1978).

F. Óxidos de hierro, manganeso y aluminio

“Estos óxidos juegan un importante papel en la retención de los metales pesados. Tienen una alta capacidad de fijar a los metales e inmovilizarlos (RIEUWERTS *et al.*, 2006). La importancia de los óxidos hidratados en la retención de los metales depende aparentemente de las condiciones de óxido-reducción del suelo, ya que en condiciones reductoras hay mayor disolución de los óxidos. Recientemente se ha demostrado que los óxidos de Fe y Mn tiene mayor capacidad de adsorción de metales pesados que los óxidos de Al y otros minerales de arcilla” (BASTA, 2004; citado por CARRASCO, 2005).

G. Presencia de macro y micronutrientes en la solución del suelo

“La adición de nitrógeno y fósforo a los suelos en distintas cantidades y formas químicas, afecta la absorción de cadmio por las plantas debido a que se producen cambios en el pH y en la capacidad de intercambio catiónico de los suelos. Los cambios de pH producto de la aplicación de los fertilizantes y la consecuente modificación en la fracción Cd-disponible, dependerá en parte de la dosis y la frecuencia de aplicación del fertilizante” (LI *et al.*, 2011). (TILLER, 1989) “Refiere estudios que demuestran que la aplicación de pequeñas cantidades de zinc ($< 10 \text{ kg. ha}^{-1}$) tiende a disminuir el contenido de Cd en algunos cultivos. Para esta situación el autor ha sugerido dos explicaciones posibles: en primer lugar, la deficiencia de zinc genera una situación de estrés en la planta, que daría lugar a una reducción de la membrana de las raíces facilitando la absorción del Cd. En segundo lugar, la deficiencia de zinc induce la liberación de agentes quelantes hacia la rizósfera, con el objeto de atrapar iones zinc, lo que indirectamente aumenta la disponibilidad del Cd” (TILLER, 1989)

H. Enmienda

“Es un material o sustrato que al ser adicionado en el suelo aumenta la estabilidad de los agregados y la capacidad de retención de agua, aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC)” (LOBOS, 2008), “puede crear las condiciones físicas y químicas favorables para la sobrevivencia y el

desarrollo inicial de las plantas, mejora las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los sustratos” (SANTIBÁÑEZ, 2006).

I. Carbonatos

“En suelos mediterráneos, los carbonatos también pueden tener un papel importante en la retención o solubilidad de los metales en el suelo, al proporcionar sitios superficiales para las interacciones con los metales pesados, adsorción o reacciones de precipitación, y, de manera indirecta, por el efecto que el cambio de pH tiene en otros constituyentes del suelo” (MARTÍNEZ y MOTTO, 2000). “La precipitación de carbonatos de cadmio (CdCO_3) predomina cuando hay elevadas concentraciones de cadmio, mientras que a bajas concentraciones de cadmio la adsorción química conlleva a la formación de complejos de superficie” (PAPADOPOULOS y ROWELL, 1989).

J. Resistencia a la penetración del suelo (RPS)

“La resistencia a la penetración del suelo (RPS), es la capacidad del suelo para dificultar la penetración de un cuerpo rígido. La magnitud de esta presión se mide en megapascales, MPa o kg/cm^2 ” (SELLÉS *et al.*, 2012). “Esta resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como densidad aparente, contenido de agua, contenido de materia orgánica y densidad radicular. Muchos estudios han utilizado el penetrómetro para caracterizar la resistencia natural del suelo. Existen diversos tipos de penetrómetros, los más comunes son el penetrómetro de bolsillo, el penetrómetro proctor y el penetrómetro de cono” (Nacci, 1992; citado por CONTRERAS, 2006).

En el Cuadro 5, se presentan valores interpretativos de resistencia a la penetración del suelo medido en condiciones de capacidad de campo (contenido de agua que retiene una muestra de suelo saturada y luego sometida a una tensión de - 0.33 bares).

Cuadro 5. Categorización de la RPS (penetrómetro de bolsillo).

Categoría	Resistencia (kg/cm²)
Extremadamente baja	<0.10
Muy baja	0.10 – 1.02
Baja	1.02 – 10.20
Moderada	10.20 – 20.39
Alta	20.39 – 40.78
Muy alta	40.78 – 81.58
Extremadamente alta	>81.58

FUENTE: SELLÉS *et al.* (2012).

K. Otros factores

“Hay otros factores que afectan la solubilidad de los metales en el suelo y su biodisponibilidad para las plantas; entre ellos la actividad microbiana del suelo, por ejemplo, puede inmovilizar metales favoreciendo la precipitación de sulfatos y óxidos de Fe hidratados. Las bacterias del suelo afectan la biodisponibilidad al absorber metales a través de grupos orgánicos funcionales de su pared celular o al acidificar el suelo” (SOLER-ROVIRA *et al.*, 2010).

2.2.3. PROCESOS DEL SUELO INVOLUCRADOS EN LA DISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS

A. Capacidad de intercambio catiónico

“En general, la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de los metales en la solución del suelo. Así, un suelo con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta tiene más sitios de intercambio en la fracción coloidal del suelo, los que estarán disponibles para una mayor adsorción y posible inmovilización de los metales (SILVEIRA *et al.*, 2003). El poder de adsorción de los distintos metales pesados (cadmio, plomo, mercurio, estaño, etc.) depende de su valencia y del radio iónico hidratado, a mayor tamaño y menor valencia, menos fuertemente quedan retenidos” (PIERZYNSKI *et al.*, 2000).

“El incremento en CIC a valores de pH por debajo de 7 en el horizonte superficial es debido probablemente a la disociación de grupos COOH de la materia orgánica y al Al polimérico” (ADAMS, 1995).

“Generalmente, los suelos con elevada CIC (ricos en materia orgánica y con altos contenidos de arcilla), se asegura una cierta inmovilización de los metales pesados por quedar estos retenidos por adsorción al complejo coloidal del suelo” (RUDA DE SCHENQUER, 2004).

B. Adsorción específica

“Como consecuencia de la adsorción específica, los metales son removidos de la solución suelo y retenidos en la superficie de los coloides formando moléculas estables, llamadas complejos de esfera interna. Este mecanismo muchas veces no es reversible. La adsorción específica se produce por la afinidad de algunos cationes metálicos por un sitio particular de adsorción, por esta razón los metales son adsorbidos específicamente en cierto orden de preferencia, por ejemplo, $Cd < Zn < Cu < Pb$, por lo tanto, los metales no siempre están afectados por la competencia de otros cationes” (LAMB *et al.*, 2009).

C. Precipitación

“Los iones metálicos en la solución suelo pueden precipitar con un agente químico, generalmente aniones como fosfatos, carbonatos o sulfatos” (LI *et al.*, 2010). “También pueden precipitar como hidróxidos al reaccionar con los iones de la solución. La precipitación/disolución son procesos que, además se ven influenciados por el pH y el potencial redox del suelo” (CARRASCO, 2005).

“Las reacciones de precipitación están asociadas normalmente a suelos alcalinos y calcáreos con concentraciones relativamente altas de metales pesados, y además a condiciones que favorezcan una baja solubilidad de estos metales o a la presencia de pocos sitios de adsorción específica” (SILVA, 2004).

D. Complejación y quelación

“Dentro de los ligandos complejantes orgánicos se encuentran los ácidos cítrico, oxálico y gálico, además de ácidos complejantes más estructurados, como aquellos incluidos en las fracciones húmica y fúlvica solubles” (EVANS, 1989).

2.2.4. DINÁMICA DE LOS METALES PESADOS EN EL SUELO

“La dinámica de los metales pesados en el suelo puede clasificarse resumidamente en cuatro vías: movilización a las aguas superficiales o subterráneas; transferencia a la atmósfera por volatilización; absorción por las plantas e incorporación a las cadenas tróficas, retención de metales pesados en el suelo de distintas maneras: disueltos o fijados, retenidos por adsorción, complejación y precipitación” (GARCÍA y DORRONSORO, 2005).

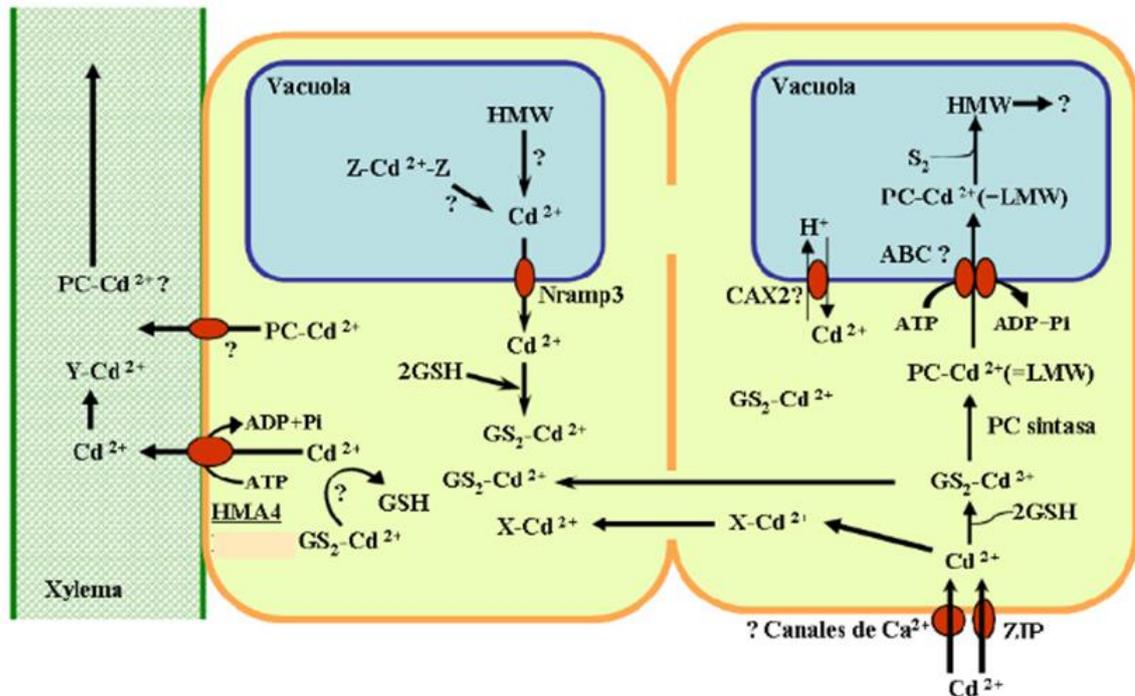
2.2.5. COMPORTAMIENTO DEL CADMIO EN EL SUELO

“Bajo condiciones extremas de oxidación tiende a formar minerales como CdO y CdCO_3 y a acumularse en fosfatos y en depósitos biolíticos” (BAUTISTA, 1999). “En suelos ácidos, la concentración de Cd^{2+} puede ser importante, ya que este ion se adsorbe débilmente en las arcillas y otras partículas materiales. Sin embargo, por encima de un pH de 7 el Cd^{2+} precipita como sulfuro, carbonato o fosfato” (BAIRD, 2001). “La concentración de cadmio promedio en los suelos es de 0.07 a 1.1 mg/kg. A valores altos de pH el cadmio no es móvil, posiblemente por la baja solubilidad de los carbonatos y fosfatos, en la movilidad del cadmio también es importante la alta afinidad del cadmio con la materia orgánica, oxihidróxidos de hierro, alófano e imogolita, no así con las arcillas. En general podemos decir que a pH ácido los oxihidróxidos de hierro y la materia orgánica controlan la solubilidad del cadmio y que a pH alcalinos el Cd precipita, por lo que es inmóvil” (DIEZ, 2008).

2.2.6. INGRESO TRANSPORTE Y ACUMULACIÓN DEL CADMIO EN LAS PLANTAS

Es bien conocido que un exceso de cationes esenciales como el Zn^{2+} y el Ca^{2+} , producen un efecto protector frente a la toxicidad del cadmio

(ARAVIND y PRASSAD, 2005), lo que sugiere la existencia de una competencia de estos cationes por la entrada a la planta. “Entre las proteínas responsables de la entrada de Cd a la célula cabe destacar el transportador específico de Ca LCT1 (CLEMENS *et al.*, 1998), y la proteína IRT1, perteneciente a la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP)” (GUERINOT, 2000). “Una vez dentro de la célula el cadmio puede coordinarse con ligandos de S como glutation (GSH) o fitoquelatinas (PCs) y ácidos orgánicos como el citrato” (CLEMENS, 2006; DOMÍNGUEZ-SOLÍS *et al.*, 2004). “Otras posibles moléculas responsables de la quelación del cadmio son pequeñas proteínas ricas en cisteína denominadas metalotioneínas (MTs) de esta forma, los complejos Cd-ligando pueden ser transportados al interior de la vacuola o a otras células” (SHAH y NONGKYNRH, 2007); asimismo en la planta, “el cadmio se acumula preferentemente en la raíz secuestrado en la vacuola de las células, y sólo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta, concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas” (CHAN y HALE, 2004). En la Figura 4 se muestra un esquema del ingreso del cadmio a



través de las células de la raíz, hasta llegar al xilema de las plantas.

Figura 4. Representación esquemática de los mecanismos de entrada, secuestro y translocación del cadmio en raíces (CLEMENS, 2006).

2.2.7. EFECTO TÓXICO DEL CADMIO EN LAS PLANTAS

Uno de los síntomas más visibles de la toxicidad por cadmio es la clorosis, debido a la deficiencia del hierro (BENAVIDES *et al.*, 2005), deficiencia de fosfato o reducción del transporte del elemento manganeso (GOLDBOL y HUTTERMAN, 1985). “El cadmio también reduce la absorción de nitratos y el transporte de los mismos de la raíz al tallo, mediante la inhibición de la actividad nitrato reductasa en tallos” (GOUJA *et al.*, 2000). “La tasa de transferencia de cadmio depende del tipo de suelo y la planta, el pH del suelo, contenido de humus, la disponibilidad de la materia orgánica, el tratamiento del suelo con fertilizantes, la meteorología, y la presencia de otros elementos como el zinc” (FAO, 2012). En el Cuadro 6, se muestra los coeficientes de transferencia de metales pesados del suelo a la planta.

Cuadro 6. Coeficientes de transferencia de metales pesados del suelo a la planta.

Elemento	Coeficiente de transferencia suelo - planta
Cd	1.00 – 10.00
Co	0.01 – 0.10
Cr	0.01 – 0.10
Cu	0.10 – 10.00
Hg	0.01 – 0.10
Ni	0.10 – 1.00
Pb	0.01 – 0.10
Tl	1.00 – 10.00
Zn	1.00 – 10.00
As	0.01 – 0.10
Be	0.01 – 0.10
Se	0.10 – 10.00
Sn	0.01 – 0.10

Fuente: ALLOWAY (1995); citado por CALDERON y CONCHA (2002).

Las concentraciones de cadmio para varias especies en tejidos de hojas maduras, se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Concentraciones de elementos traza para varias especies en tejidos de hojas maduras.

Elemento	Concentración (mg/kg, peso seco)		
	Suficiente o normal	Excesiva o tóxica	Tolerable en cultivos agrícolas
Cr	0.1 - 0.5	5 - 30	2
Mn	30 - 300	400 - 1000	300
Ni	0.1 - 5	10 - 100	1 - 10
Cu	5 - 30	20 - 100	5 - 20
Zn	27 - 150	100 - 400	50 - 100
As	1 - 1.7	5 - 20	0.1 – 1.0
Se	0.01 - 2*	5 - 30	1 - 5**
Mo	0.2 - 5	10 - 50	-
Cd	0.05 - 0.2	5 - 30	0.05 - 0.5
Hg	-	1 - 3	0.05 - 0.5
Pb	5 - 10	30 - 300	0.5 - 10

Fuente: KABATA-PENDIAS (2000).

*Base húmeda, **2-5 mg kg forraje peso seco causa toxicidad en animales

En el Cuadro 8 se visualiza las concentraciones de metales pesados en tejidos de hoja.

Cuadro 8. Concentraciones de metales pesados (mg/kg peso seco) en tejidos de hoja generalizados para varias especies vegetales.

Elemento	Deficiente	Suficiente o normal	Excesiva o tóxica	Tolerable en cultivos
Zn	10 - 20	27 - 150	100 - 400	50 - 100
Cd	-	0.05 - 0.2	5 - 30	0.05 - 5
Cu	2 - 5	5 - 30	20 - 100	5 - 20
Ni	-	0.1 - 5	10 - 100	1 - 10
Pb	-	5 - 10	30 - 300	0.5 - 10
As	-	1 - 1.7	5 - 20	0.2
Hg	-	-	1 - 3	0.2

Cr	-	0.1 - 0.5	5 - 30	2
----	---	-----------	--------	---

Fuente: PENDIAS (2001); citado por SANTIAGO (2013).

2.2.8. CONTAMINACIÓN DEL CACAO CON CADMIO

El cadmio (Cd) es talvez el metal pesado con más atención por su relación con una serie de trastornos incluidos el cáncer, y por su extremadamente bajo valor de toleración en productos derivados del cacao, investigaciones por parte de la Unión Europea establecieron un rango entre 0.1-0.8 mg/kg de este metal en productos de chocolate y cacao en polvo (INIAP, 2015). “El rango tolerable de Cd según la organización mundial de la salud es de 7 mg por kg de peso corporal/semana, es decir, 60 - 70 mg por día para un adulto” (López, 2012; citado por LARA, 2017).

“El cadmio en el fruto del cacao se distribuye de manera desigual, la investigación en Ecuador ha encontrado que la mayor cantidad de cadmio se acumula en el jugo y la pulpa (mucilago) del cacao. Este cadmio puede moverse hacia la testa y almendra del cacao y terminar finalmente en el chocolate” (INIAP, 2015). Existen diversas normas y regulaciones dependiendo de la región y el mercado, para los niveles máximos permisibles de cadmio en granos y productos de cacao procesados, como se muestran en los Cuadros 9 y 10.

Cuadro 9. Propuestas de niveles máximos para cadmio en el chocolate y productos derivados de cacao, según la FAO/OMS.

Productos	Nivel máximo de cadmio (mg/kg)
1. Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao <30%.	0.20
2. Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao <50%; chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥30%.	0.60
3. Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao ≥50%.	2.00
4. “Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para	1.50

beber)".

Fuente: CODEX ALIMENTARIUS (2014).

Cuadro 10. Niveles máximos admisible de cadmio en el chocolate y derivados de cacao según la Unión Europea (UE).

Productos	Nivel máximo de cadmio (mg/kg)
Chocolate con leche con un contenido en materia seca total de cacao < 30%.	0.10
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao < 50%; y ≥ al 30%.	0.30
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 50%	0.80
"Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)".	0.60

Fuente: Unión Europea (2014); citado por Díaz (2014).

2.2.9. DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS

"Para la determinación de metales pesados existen diversas técnicas electroquímicas y espectrométricas. Dentro de las técnicas espectrométricas las más utilizadas son: espectrometría de absorción atómica con llama (FAAS), espectrometría de absorción atómica con horno de grafito (GFAAS), espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros (HG-AAS), espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente" (ICP-OES) (BARRUETA, 2013). Los límites ópticos de detección de las técnicas espectrométricas, se observan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Límites óptimos de detección (LOD) de cadmio de diferentes métodos de análisis.

Técnica	Límite de detección
F-AAS	0.8 - 1.5 µg/L
ICP-OES	0.1 - 1.0 µg/L

GF-AAS	0.002 - 0.02 µg/L
ICP-MS	0.00001 - 0.001 µg/L

Fuente: EFSA (2009).

“La precisión que se puede obtener en forma rutinaria se encuentra en el siguiente rango: 0.5% para FAAS, 1.5% para ICP-AES, 3-5% para GFAAS y 2-3% para ICP-MS. La exactitud depende de la calidad de los estándares, el rango de concentración, la presencia de interferencias, el grado de contaminación, etc” (BARRUETA, 2013).

2.2.10. CADMIO EN LA SALUD HUMANA

“La población general está expuesta al cadmio a través de la contaminación del aire, agua, suelos, alimentos y el tabaco, siendo la dieta la principal fuente de exposición al cadmio para no fumadores. Hasta el momento se han determinado altas concentraciones de cadmio en mariscos, hígado, riñón, semillas de oleaginosas, granos de cacao y en ciertas setas. Cereales como el arroz y el trigo, vegetales de hoja verde, patatas y hortalizas de raíz como la zanahoria contienen las concentraciones más altas de cadmio, y se estima que más de 80% de la ingesta del metal procede de este tipo de alimentos” (SÁNCHEZ, 2016).

A. Comportamiento del cadmio en el organismo

“El cadmio una vez absorbido es transportado por la sangre a distintos tejidos y órganos, entre los que destacan riñones e hígado ya que retienen cerca del 30 - 50% de la carga corporal total de cadmio, cuya semivida es de 10 - 30 años aproximadamente. El tejido óseo también es importante como lugar de acumulación del metal. Las metalotioneínas presentes en el hígado y riñón son responsables de la retención del cadmio en dichos órganos, y ejercen una acción protectora al facilitar la eliminación del metal: el complejo cadmio-metalotioneína puede ser filtrado por el glomérulo y excretado en la orina” (WHO, 1992; citado por SÁNCHEZ, 2016).

B. Patologías asociadas al cadmio

La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha clasificado al cadmio en la categoría I (carcinógeno para los humanos, con evidencia

epidemiológica suficiente). Patologías: nefrotóxico (7 ug/kg de peso), disminuye los niveles de calcio en los huesos, produce la insuficiencia renal, causa la proteinuria; en 1912, en Japón se descubrió la enfermedad denominada ITAI ITAI; que provocaba deformación de huesos; debido al consumo de arroz contaminado con cadmio procedente de relaves mineros (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY, 2012).

C. Regulaciones internacionales

Ingesta semanal tolerable en los alimentos = 2.5 ug/kg de peso corporal (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, 2009; citado por SÁNCHEZ, 2016). El rango tolerable de la Organización Mundial de Salud es de 7 ug de Cd por kg de peso corporal por semana, es decir, 60 – 70 ug de Cd por día para una persona; cadmio en agua para consumo humano: 5 µg/L y cadmio en el aire: 5 ng/m³ (SÁNCHEZ, 2016).

2.3. ABONO ORGÁNICO

“El término abono orgánico se emplea para abarcar todo tipo de enmienda orgánica al suelo, incluyendo tanto los estiércoles animales, los restos vegetales y los elaborados como la composta, bocashi y otros” (VÁSQUEZ y GÓMEZ, 2011).

El compost. “Abono orgánico que se obtiene de la descomposición del estiércol, mezclado con residuos vegetales y otros ingredientes orgánicos. Los microorganismos como bacterias, hongos y lombrices descomponen los tejidos de las plantas muertas. Para una buena descomposición debe haber circulación de oxígeno (aeróbica), y se debe controlar la humedad y la temperatura del material” (VARNERO, 2001).

“El compost funciona como medio de almacenamiento de nutrientes del suelo, contrarresta los procesos erosivos causados por el agua y el viento, aumentando la porosidad, permeabilidad y proporciona una textura friable. Esto mejora la retención de agua en suelo, proporciona alimento a los organismos benéficos del suelo, contribuyendo a su mineralización, atenúa los cambios bruscos de temperatura en el suelo, mejora las condiciones químicas, físicas y

biológicas del suelo, la materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura del suelo, aumenta el contenido de macro y microelementos, la población microbiana que contiene, son benéficas y ayuda a la fertilización de los suelos, es un producto que no daña el medio ambiente, recupera los suelos agotados por el uso intensivo de monocultivos y recupera los suelos marginales que no se utilizan como suelos agrícolas” (GUARDADO, 2012).

En promedio los compost presentan la siguiente composición química, como se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Composición química promedio del compost.

Características									
MO (%)	pH	C.E (Ms/cm)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (ppm)	Fe (ppm)
50.00 -	7.00 -	4.00 -	1.50 -	1.00 -	0.20 -	1.00 -	0.20 -	100.00 -	3000.00 -
60.00	7.50	6.00	2.50	2.00	0.80	3.00	0.50	500.00	10000.00

Fuente: GUTENBERT (2000).

2.4. ENMIENDAS CÁLCICAS Y MAGNÉSICAS

2.4.1. DOLOMITA

“En la agricultura, la dolomita al igual que la calcita, es una fuente de magnesio y calcio que constituye un fertilizante indispensable al modificar el pH del suelo, logrando regular su acidez, mejorándolo e incrementando el rendimiento de los cultivos” (COORDINACIÓN GENERAL DE MINERÍA, 2013).

“Existen dos principales vertientes a conocer de la dolomita: como aditivo del suelo y la dolomita que se usa como materia base para los fertilizantes de magnesio de calcio. Aumenta la productividad del terreno por el rápido aumento del pH del suelo (disminuye la acidez) y/o ayuda a corregir deficiencias de magnesio y/o ratios (cocientes) de calcio - magnesio. Cuando se aplican en 2.5 t/ha puede alcanzar resultados similares a la re-elevación del

pH y reducir la toxicidad de aluminio” (COORDINACIÓN GENERAL DE MINERÍA, 2013).

Cuadro 13. Propiedades químicas de la dolomita.

Parámetro	Valor
Carbonato de calcio, CaCO ₃	55.35 %
Óxido de calcio, CaO	31.00 %
Carbonato de magnesio, MgCO ₃	42.25 %
Óxido de magnesio, MgO	20.20 %
Óxido de silicio, SiO ₂	01.65 %
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	00.23 %
Alúmina, Al ₂ O ₃	00.21 %
Mn ₂ O ₃	00.02 %
K ₂ O	00.08 %
Pérdida de ignición	46.40 %

Fuente: COORDINACIÓN GENERAL DE MINERÍA (2013).

2.4.2. MAGNOCAL

“Es un producto natural compuesto de minerales extraídos de canteras en Ocucaje - Ica, y es cuidadosamente procesado y balanceado con elementos esenciales para todo tipo de cultivo. Las fuentes nutricionales básicas de este producto son: calcio, magnesio, manganeso, azufre en forma de sulfato y arcillas bentoníticas” (SULFATOS NATURALES, 2016).

Cuadro 14. Composición química del magnocal.

Parámetro	Valor
Óxido de magnesio, MgO	5 a 8 %
Óxido de calcio, CaO	4 a 7 %
Sulfato	25 - 35 %
Manganeso	250 ppm
Bentonita	33 %
pH	6.5

Fuente: SULFATOS NATURALES (2016)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CAMPO EXPERIMENTAL

3.1.1. UBICACIÓN

El presente trabajo de tesis se llevó a cabo en un suelo residual, unidad fisiográfica correspondiente a lomada, en la finca denominada “San José” perteneciente al Sr. José Natividad Pérez, ubicada en el caserío de Marona Baja, distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Según la clasificación del científico norteamericano Holdridge, esta zona corresponde a un clima de Bosque Muy Húmedo Tropical (bmh - T), con temperatura media de 25.53 °C, cuyas coordenadas geográficas son las siguientes: mE 396097, mN 8979820 con una altitud de 684 msnm.

3.1.2. HISTORIA

La presente investigación se realizó en una plantación de cacao clon CCN-51 de catorce (14) años de edad; actualmente dicha plantación de cacao cuenta con certificación orgánica; con una producción aproximada de 500 kg de grano seco/ha/año. La plantación de cacao es manejada con sombra permanente (*Inga edulis*). Anteriormente en dicho suelo se cultivó coca (*Erythroxylum coca*), lo cual trajo como consecuencia la degradación del mismo. El cadmio total inicial en el suelo fue de 0.91 ppm. El contenido inicial de cadmio total en los granos de cacao fue de 6.70 ppm; muy por encima de los niveles máximos permitidos por la Unión Europea que es de 0.50 ppm (Más y Azcue, 1993; citados por GARCÍA y DORRONSORO, 2002).

3.1.3. DATOS METEOROLÓGICOS

En el Cuadro 15, se presentan los datos meteorológicos, obtenidos de la Estación Experimental Meteorológica "José Abelardo Quiñones" de Tingo María; correspondiente al periodo entre marzo del 2017 y setiembre del 2018; cuyos valores promedios son: temperatura 25.53 °C,

precipitación 264.87 mm/mes, humedad relativa 83.84% y finalmente las horas sol promedio fue de 158.04; la mayor insolación se produjo en el mes de agosto.

Cuadro 15. Datos meteorológicos registrados durante la ejecución del experimento (marzo 2017 – setiembre 2018).

Meses	Temperatura (°C)			Precipitación (mm)	H R (%)	Insolación (Horas sol)
	Max.	Med.	Min.			
Marzo	29.70	25.20	20.80	432.70	86.00	104.40
Abril	30.90	26.00	21.20	204.20	85.00	152.50
Mayo	31.00	26.10	21.20	326.10	84.00	181.90
Junio	30.60	25.70	20.80	158.60	82.00	174.20
Julio	30.30	24.90	19.60	26.90	85.00	186.90
Agosto	31.50	25.60	19.80	142.40	83.00	204.70
Setiembre	31.10	26.00	20.90	221.00	82.00	156.30
Octubre	31.50	26.20	20.90	341.30	82.00	188.30
Noviembre	30.20	25.60	21.10	688.20	85.00	119.00
Diciembre	30.30	25.70	21.10	349.90	84.00	140.90
Enero	30.10	25.40	20.60	404.40	86.00	131.30
Febrero	29.80	25.60	21.30	305.90	85.00	101.00
Marzo	29.90	25.30	20.80	485.00	85.00	116.90
Abril	29.90	25.40	20.60	224.80	86.00	140.20
Mayo	30.60	25.60	20.70	181.20	84.00	177.20
Junio	29.40	24.60	19.70	182.60	85.00	160.00
Julio	30.40	24.90	19.50	62.40	83.00	175.40
Agosto	30.70	25.10	19.00	214.60	82.00	196.30
Setiembre	32.30	26.10	20.00	80.40	79.00	195.40
Total	580.20	485.00	389.60	5032.60	1593.00	3002.80
Promedio	30.54	25.53	20.51	264.87	83.84	158.04

Fuente: “Universidad Nacional Agraria de la Selva, Estación Meteorológica: José Abelardo Quiñonez – Tingo María”.

3.1.4. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL SUELO

Del campo experimental se sacó una muestra representativa de suelo, antes de la aplicación de los tratamientos; la misma que se llevó al laboratorio de análisis de suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina - Lima, para su análisis de caracterización completa y especial.

En el Cuadro 16, se presenta los resultados del análisis físico-químico del suelo el cual tiene las siguientes características:

Cuadro 16. Análisis físico-químico del suelo (campo experimental).

Parámetro	Valor	Método empleado
Análisis físico:		
Arena (%)	22.00	Hidrómetro
Arcilla (%)	30.00	Hidrómetro
Limo (%)	48.00	Hidrómetro
Clase textural	Franco arcilloso	Triángulo textural
Análisis químico:		
pH (1:1) en agua	4.06	Potenciómetro
M. O. (%)	2.15	Walkley y Black
N - Total (%)	0.11	% M.O. x 0.05
Fósforo disponible (ppm)	23.30	Olsen modificado
K disponible (ppm)	78.00	Acetato de amonio pH 7
Pb total (ppm)	165.89	EAA
Cd total (ppm)	0.91	EAA
Ca cambiable (meq/100 g)	2.28	EAA
Mg cambiable (meq/100 g)	0.40	EAA
K cambiable (meq/100 g)	0.19	EAA
Na cambiable (meq/100 g)	0.07	EAA
Al + H cambiable (meq/100 g)	1.70	Yuan
Suma de cationes (meq/100 g)	4.64	EAA
Suma de bases (meq/100 g)	2.94	EAA
CIC (meq/100 g)	13.12	EAA
Bas. Camb. (%)	22.00	Ca + Mg + K + Na/CIC x 100
Ac. Camb. (%)	78.00	CIC – Bas. Camb.

Fuente: "Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina – Lima".

3.2. COMPONENTES EN ESTUDIO

3.2.1. MATERIAL VEGETAL

Cacao clon CCN-51 de 14 años de edad.

3.2.2. ENMIENDAS ORGÁNICAS

A. Compost

Compost elaborado a base de residuos vegetales como cáscara de plátano, aserrín, excremento de animales, carbono, dolomita y microorganismos eficientes. Composición química: 1.18% N – 1.75% P₂O₅ – 2.02% K₂O – 3.38% CaO – 0.92% MgO – 0.39% S – 0.77% Na – 21.00 ppm Cu – 145.78 ppm Zn – 199.72 ppm Mn – 2343.95 ppm Fe – 66.66 ppm B – 0.22 ppm Cd – Relación carbono/nitrógeno igual a 9.33 y ácidos húmicos 12%.

B. Dolomita

Material mineral extraído de la comunidad “Cueva de las Pavas”, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Composición química: 20.58% MgO – 30.04% CaO – 0.19% S – 185.00 ppm Mn – 562.00 Fe – 530.00 ppm B – 0.20 ppm Cd.

C. Magnocal

Fertilizante natural obtenido de la comunidad de Ocucaje – Ica – Perú. Composición química: 2.25% MgO – 11.70% CaO – 1.17% P₂O₅ – 7.80% S – 0.90% Na – 211.00 ppm Mn – 11688.30 Fe – 630.00 ppm B – 36.85 ppm Cd.

Producto mineral certificado por la certificadora orgánica “Control Union Certifications”.

3.3. TRATAMIENTOS EN ESTUDIO

En el Cuadro 17, se presenta la descripción de los tratamientos en estudio.

Cuadro 17. Descripción de los tratamientos en estudio.

Tratamiento	Descripción	Dosis	
		kg/planta	Toneladas/ha
T ₀	Testigo	00.00	00.00
T ₁	Compost	27.00	30.00
T ₂	Dolomita	1.80	2.00
T ₃	Dolomita	3.60	4.00
T ₄	Compost + dolomita	27.00 + 1.80	30.00 + 2.00

T ₅	Compost + dolomita	27.00 + 3.60	30.00 + 4.00
T ₆	Magnocal	2.70	3.00

3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se empleó el diseño de bloques completamente al azar (DBCA), con 7 tratamientos incluido el testigo y 4 repeticiones, asimismo; las características evaluadas fueron sometidas al análisis de variancia y para la comparación de promedios se utilizó la prueba de Duncan con un nivel de significación de $\alpha=0.05$.

3.4.1. MODELO ESTADÍSTICO

El modelo estadístico utilizado en la presente investigación es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Es la j-ésima parcela, dentro del i-ésimo tratamiento

μ = Es la media general

τ_i = Efecto del i-ésimo tratamiento de materia orgánica

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

ε_{ij} = Error experimental asociado al j-ésimo bloque del i-ésimo tratamiento.

Para:

$i = 1, 2, 3$ (fuentes de materia orgánica)

$j = 1, 2, 3, 4$ (repeticiones)

Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el programa estadístico InfosStat versión 2014.

3.4.2. ANÁLISIS DE VARIANCIA (ANVA)

En el Cuadro 18, se presenta el esquema del análisis de variancia.

Cuadro 18. Esquema del análisis de variancia (ANVA).

Fuente de variabilidad	Fórmula	Grados de libertad
Bloques	$r-1$	3
Tratamientos	$t-1$	6
Error experimental	$(t-1)(r-1)$	18
Total	$tr-1$	27

3.5. CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO EXPERIMENTAL

- Bloques
 - Número de bloques : 4
 - Largo del bloque : 84 m
 - Ancho del bloque : 9 m
 - Área del bloque : 756 m²
 - Área de bloques : 3024 m²
 - Plantas por bloque : 84
- Unidades experimentales
 - Número de unidades experimentales : 28
 - Unidades experimentales por bloque : 7
 - Largo de la unidad experimental : 12 m
 - Ancho de la unidad experimental : 9 m
 - Plantas por unidad experimental : 12
 - Área de la unidad experimental : 108 m²
 - Plantas por parcela neta : 2
 - Área de la parcela neta : 18 m²
- Distanciamiento de siembra
 - Distancia entre plantas : 3 m

Distancia entre hileras	: 3 m
• <u>Plantas en el experimento</u>	
Plantas por bloque	: 84
Plantas en el experimento	: 336
Plantas evaluadas por bloque	: 14
Plantas evaluadas en el experimento	: 56
• <u>Dimensión del campo experimental</u>	
Largo	: 84 m
Ancho	: 36 m
Área total del experimento	: 3024 m ²

3.6. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.6.1. ROTULACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Previo a la rotulación se realizó el desmalezado del campo experimental (parcela), utilizando para ello motoguadaña; asimismo, en la rotulación de los tratamientos se utilizó cintas plásticas multicolores por cada tratamiento: blanco (T₀), morado (T₁), amarillo (T₂), anaranjado (T₃), rojo (T₄), plomo (T₅) y azul (T₆). Las plantas (2) de la parcela neta se identificaron con cintas de agua de color rojo, enumeradas 1 y 2.

3.6.2. APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Los tratamientos fueron aplicados debajo de la proyección de la copa del árbol de cacao, luego fueron tapados con abundante hojarasca con el apoyo de una pequeña horqueta de madera. Los tratamientos se aplicaron en una sola dosis en el mes de mayo del 2017.

3.6.3. MANTENIMIENTO DE LA PLANTACIÓN

La plantación de cacao recibió dos podas una poda de mantenimiento en el mes de setiembre del 2017 y una poda fitosanitaria en el mes de febrero del 2018.

El control de enfermedades se realizó mediante el método cultural (recolección de frutos enfermos y raleo de sombra).

3.6.4. MUESTREO Del GRANO DE CACAO

Se cosechó una muestra de 250 gramos de grano fresco, procedente de mazorcas maduras de las dos (2) plantas centrales (parcela neta) de cada unidad experimental; la extracción de los granos se realizó utilizando un machete sin filo, las muestras fueron codificadas y almacenadas en bolsas ziploc de primer uso, según el bloque y tratamiento correspondiente. El muestreo del grano de cacao se llevó a cabo en la cosecha grande entre marzo y agosto del 2018, simultáneamente con el muestreo del suelo.

Utilizando costales de yute, las muestras de cacao fueron secadas a través de radiación solar directa, hasta una humedad aproximada del 7%. A las muestras de cacao no se les realizó el proceso de fermentación. El secado se realizó en el centro de beneficio de la Cooperativa Agroindustrial Cacao Alto Huallaga (Castillo Grande, Leoncio Prado).

3.6.5. MUESTREO DEL SUELO

Las muestras de suelo fueron colectadas a una profundidad de 20 cm en el mes de agosto (2018). Por cada unidad experimental se obtuvo una muestra constituida por dos (2) kilos de suelo; producto de diez (10) puntos de muestreo, realizados alrededor de las 2 plantas de cacao (5 puntos por planta) de la parcela neta; exactamente debajo de la proyección de la copa de la planta en la zona donde se aplicó las enmiendas. La hojarasca superficial de cada punto de muestreo fue removida previamente a la colecta de las muestras.

Para el muestreo se utilizó un muestreador de suelo y bolsas ziploc de primer uso, previamente codificadas por tratamiento y bloque; las muestras fueron secadas bajo sombra, antes de ser enviadas al laboratorio, para su respectivo análisis.

3.6.6. ANÁLISIS DE LOS INSUMOS UTILIZADOS

Se desarrolló el análisis químico del compost, dolomita y magnocal, para determinar el contenido de macro y micro nutrientes (ver anexo Figuras 35, 36 y 37).

3.7. CUANTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES EVALUADAS

3.7.1. ANÁLISIS FISCOQUÍMICO DEL SUELO

El análisis del suelo se llevó a cabo siguiendo los siguientes métodos analíticos: Propiedades físicas: textura (densímetro de Bouyoucos). Resistencia a la penetración del suelo (RPS); las mediciones fueron realizadas en capacidad de campo del suelo; para ello se utilizó un penetrómetro de bolsillo modelo 29-3729 (CL-700A). Antes de cada medición, se procedió a limpiar la superficie con el fin de asegurarse de hacer las mediciones sobre el suelo y no sobre alguna piedra o material extraño. Se determinó 3 puntos de muestreo a la altura de la proyección de la copa de cada planta de cacao de la parcela neta (2 plantas). Propiedades químicas: pH (relación suelo, agua 1: 1; método del potenciómetro), conductividad eléctrica (conductímetro), P disponible (Bray I), bases intercambiables (K, Ca, Mg, Na) (Espectrofotómetro de absorción atómica de llama, mediante el método 3050B), acidez intercambiable (Al+H) (cloruro de potasio/volumétrico), materia orgánica del suelo (Walkley y Black). La capacidad de intercambio catiónico (CICE) se determinó con acetato de amonio pH 7 1 N.

La determinación del cadmio total en los suelos y las fracciones físicas y químicas se realizó según el método EPA-3050B (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) de digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos (USEPA, 1996), la cuantificación del filtrado se realizó en el espectrofotómetro de absorción atómica (SAA; modelo Varian "Spectra 55B"), hecho en Australia. Para esta variable se tomaron muestras del suelo de cada tratamiento, para su respectivo análisis. Se cuantificó cadmio total, cadmio disponible y su caracterización completa antes de la incubación en el laboratorio de análisis de suelos. Asimismo, se siguió la siguiente metodología (USEPA): 1) Se pesó 2 g de suelo, con un tamaño de partícula 2 mm. Se añadió 10 ml de HNO₃ 1:1. Seguidamente se calentó a 95 °C por 5 minutos.

Luego se enfrió y añadió 5 ml de HNO₃ concentrado. Se repitió una vez y se dejó reducir la solución hasta 5 ml. Luego se enfrió y añadió 2 ml de agua destilada y 3 ml de H₂O₂. Al cesar la efervescencia se adicionó 1 ml de H₂O₂. 2) Se repitió hasta no observar efervescencia. Se vertió 5 ml de HCl concentrado y 10 ml de agua desionizada. Se calentó por 15 minutos y dejó enfriar. Se filtró por gravedad. Se aforó a 50 ml con agua destilada. Finalmente se almacenó y mantuvo refrigerado. Cuantificación por espectrofotómetro de absorción atómica. El cadmio disponible o extraíble se determinó empleando el EDTA 0.05 M según GONZALES (1986) adaptado para este estudio, que consistió en ajustar a pH 7, con ácido clorhídrico, luego se pesó 5 gramos de TFSA (tierra fina seca al aire) y se añadió 20 ml de la solución extractante EDTA, con pH 7 y en un agitador eléctrico se agito durante 20 minutos, luego se filtró y realizo diluciones en caso sea requerido, luego se cuantificó en el espectrofotómetro de absorción atómica. El filtrado se determinó usando espectrofotómetro de absorción atómica (SAA; modelo Varian "Spectra 55B") hecho en Australia.

3.7.2. CADMIO TOTAL DEL GRANO DE CACAO

Para determinar el cadmio total de cada muestra de cacao, se procedió según la metodología de la AOAC Official Method 999.11; la cual consiste:

A. Homogenización de la muestra por tamaño; excluyendo los extremos.



Figura 5. Homogenización de los granos de cacao.

- B. Descascarillado.
- C. Secado. El secado de la muestra se realizó a 70 °C hasta un 3% de humedad, utilizando un horno eléctrico.
- D. Molienda de los granos de cacao.
- E. Calcinado. Se colocó el crisol con la muestra molida en un horno de mufla a 200 °C y se subió lentamente la temperatura a 450 °C a una velocidad de 50 °C/h. Se dejó reposar durante al menos 8 horas. Se sacó el crisol del horno y dejó enfriar.
- F. Se humedeció las cenizas del crisol con 3 ml de agua y luego se evaporó en una plancha de calentamiento.
- G. El crisol con la muestra se puso en el horno a 200 °C y se elevó la temperatura 50 °C/h a 450 °C. Se procedió con el incinerado a 450 °C durante 1 h. Se repitió el procedimiento hasta incinerar completamente el producto; es decir, la ceniza adquirió una tonalidad blanca/gris o ligeramente

coloreada. El número de repeticiones necesarias varía según el tipo de producto. Se agregó 5 ml de HCl 6 M, al crisol, asegurándonos de que toda la ceniza entró en contacto con el ácido. Se evaporó el ácido en la plancha de calentamiento. Procedimos a disolver el residuo con 20 ml de ácido nítrico. Agitamos el crisol con cuidado para que, entre toda la ceniza en contacto con el ácido, dejamos reposar durante 1 h. A continuación, agitamos la solución en el crisol al fondo con la varilla de agitación y la transferencia del contenido a fioles. Tratamos las muestras en blanco de la misma manera que los productos. Incluimos 2 muestras en blanco con cada lote analítico.

H. Espectroscopia de Absorción Atómica. La longitud de onda, programa de mezcla de gases, se encuentran dentro de los parámetros más apropiados para cada metal en el manual proporcionado con el instrumento. Cuando los resultados están fuera del rango lineal, las soluciones de prueba deben diluirse con HNO_3 .

I. Las curvas de calibración del EAA constaron como mínimo de tres estándares.

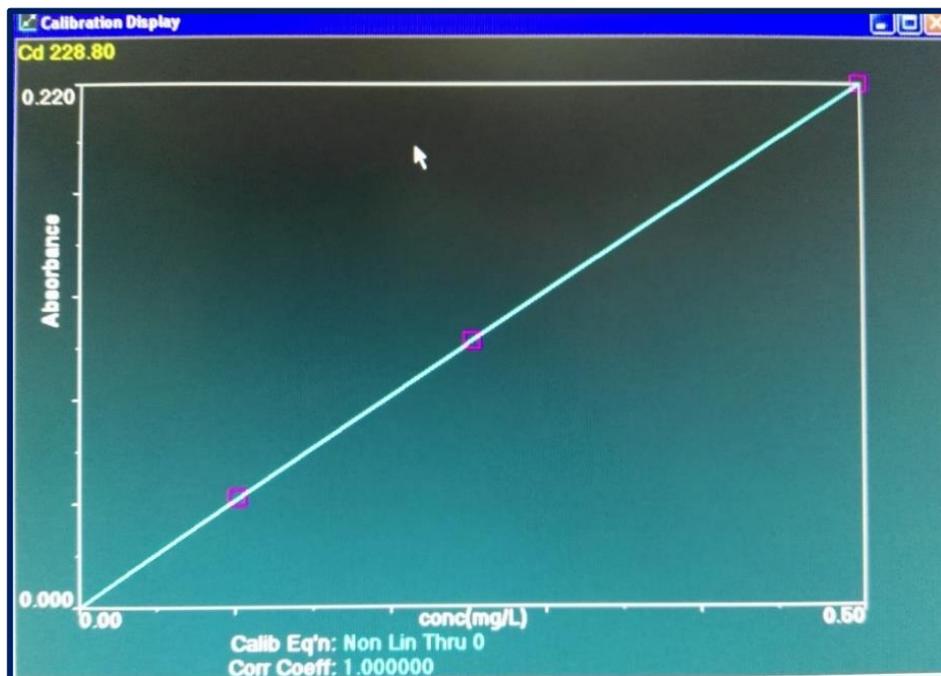


Figura 6. Curva de calibración del equipo.

3.7.3. FRACCIONAMIENTO FÍSICO, DENSIMÉTRICO DE LA MATERIA ORGÁNICA

Se consideró la fracción liviana libre (FLL), fracción liviana oclusa (FLO) y la fracción pesada (FP). La metodología empleada para el fraccionamiento densimétrico se basa en la separación por densidad de las tres (3) partículas o fracciones. Para el fraccionamiento de la materia orgánica se utilizó la solución orgánica con una densidad de 1.80 g/cm^3 (GREGORICH y ELLERT, 1993). Esta actividad se realizó en el laboratorio de análisis de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Tingo María.

El esquema de fraccionamiento por densidad se realizó según CONCEIÇÃO *et al.* (2015), en dos fases de dispersión. Al principio, se agitó 10 g de TFSA (tierra fina seca al aire) con 80 ml de ioduro de sodio (NaI) con densidad 1.80 g/cm^3 realizando un movimiento circular con la mano, para luego centrifugar a 2000 rpm/90 minutos, obteniéndose una fase sedimentada (precipitado) y suspensión que fue filtrado con una bomba al vacío que contenía un filtro de fibra de vidrio (tipo GF/A, 47 mm diámetro, retención de 1.6 mm) (Whatman International). El material orgánico retenido en el filtrado corresponde a la fracción liviana libre (FLL), que fue secado a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas y analizado la concentración de cadmio total. En la segunda fase se devolvió el NaI del filtrado anterior sobre el tubo que contenía el suelo sedimentado para realizar la dispersión de ultrasonido a 340 joule durante 20 minutos, para dispersar y romper los agregados y liberar la fracción oclusa. Luego se centrifugó la solución a 2000 rpm durante 90 minutos, después se filtró igual que en la primera fase. Las partículas retenidas en el filtro fueron secados a $60 \text{ }^\circ\text{C}/24$ horas que corresponde a la fracción oclusa (FLO), el material precipitado en el fondo del tubo es la fracción pesada que también fue secada y pesada. Se analizó el cadmio en la FLL, FLO y FP según la metodología descrita.

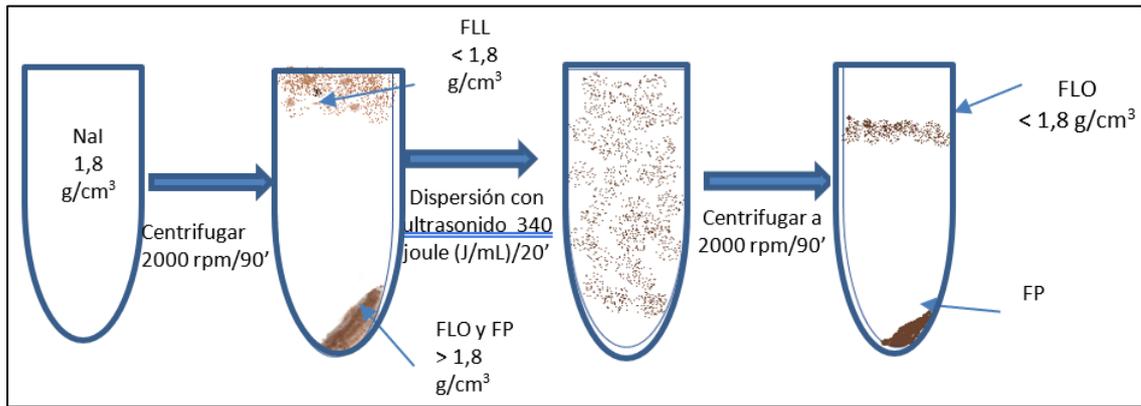


Figura 7. Fraccionamiento densimétrico de la materia orgánica (OTTOS, 2018).

3.7.4. FRACCIONAMIENTO QUÍMICO DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (MOS)

Se realizó según el método de la Sociedad Internacional de las sustancias húmicas (IHSS) propuesto por SWIFT (1996) con base en la solubilidad diferencial en soluciones alcalinas y ácidas, de acuerdo a esta solubilidad se obtienen las fracciones correspondientes a ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y humina (HUM). Esta actividad se realizó en el laboratorio de análisis de suelos de la UNAS.

A. Extracción de las sustancias húmicas (SHs)

“La primera extracción se realizó en un tubo de agitación utilizando 4.0 g de TFSA, 40 mL de NaOH 0.1 mol L⁻¹, la suspensión (S) se agitó durante 60 minutos a 150 rpm, en un agitador horizontal, después se colocó en reposo por una noche, obteniendo un extracto alcalino (EA) que es formado por la fracción del AF, AH e incluyendo el suelo. Al culminar el reposo (EA+S), se llevó a centrifugación de 5000 rpm, durante 20 minutos, el sobrenadante es transferido a un balón volumétrico. Esta operación de extracción se repitió 2 veces, por lo tanto, las suspensiones siguientes fueron agitadas por 5 minutos a 150 rpm para después estar en reposo por una hora antes de entrar nuevamente a la centrifuga, teniendo la separación entre el extracto alcalino y el residuo que viene a ser la humina (HUM). Los extractos obtenidos en las centrifugaciones se juntaron, resultando en un volumen final de 200 ml aproximadamente, ya que el volumen fue completado con agua destilada, después se transfirió en recipientes de vidrio identificados, estos

recipientes estuvieron en refrigeración para su conservación. Parte del volumen obtenido de la separación de ácidos húmicos (AH) fue utilizado para obtener los ácidos fúlvicos (AF)”.

B. Fracción de ácidos fúlvicos (AF)

“El pH de 50 ml del EA fue ajustado a 2.0 con solución de H_2SO_4 concentrado, después se puso en reposo por una noche. El precipitado (AH) fue separado de la fracción (AF) por centrifugación durante 10 minutos a 5000 rpm. El sobrenadante (AF) fue descartado y el precipitado (AH) guardado. Los valores del AF fueron obtenidos por la diferencia entre AH y el EA”.

C. Fracción de ácidos húmicos (AH)

“Después de la obtención de la fracción de ácidos fúlvicos, 15 ml de $NaOH$ 0.1 mol L^{-1} fueron adicionados al precipitado (ácidos húmicos), la fracción fue transferida para un balón volumétrico de 25 ml siendo el volumen completado con agua destilada”.

D. Fracción de humina (HUM)

Los residuos que permanecieron en el tubo de centrifugación después de la extracción del EA fueron transferidos para una lata de aluminio y secadas a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, después se procedió a moler el suelo con HUM para utilizar en posterior análisis de cadmio (SWIFT, 1996).

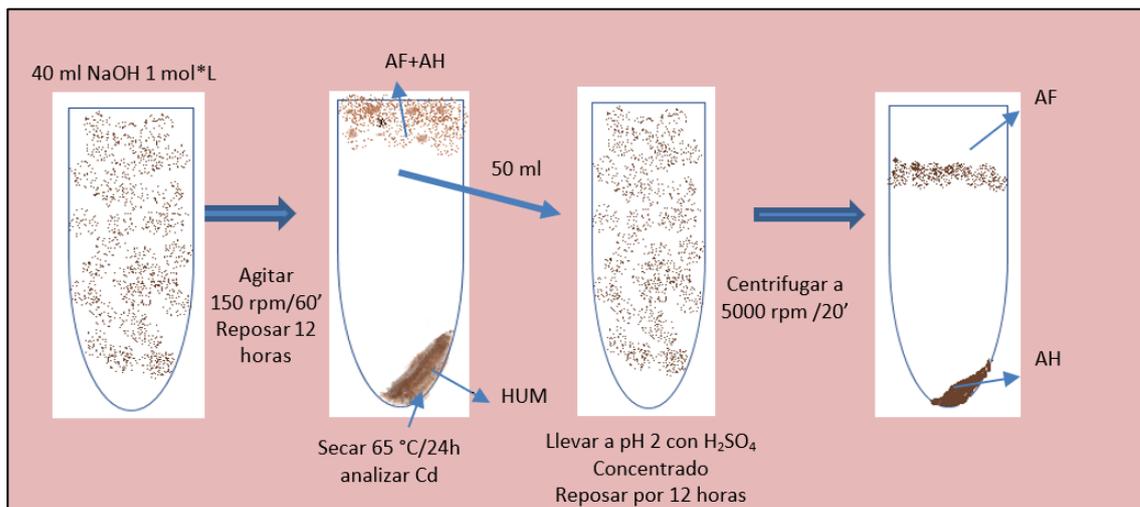


Figura 8. Fraccionamiento químico de la MOS (OTTOS, 2018).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SUELO

Las características fisicoquímicas de suelo, se sometieron al análisis de variancia (ANVA) de acuerdo a la prueba de F ($\alpha = 0.05$) (Cuadro 19), se observa que no existen diferencias estadísticas significativas para tratamientos ni bloques con respecto a la RPS; en cambio las características químicas en general muestran diferencias estadísticas significativas para tratamientos más no para bloques; es decir al menos uno o más tratamientos presentan un comportamiento estadístico diferente. Los coeficientes de variación (CV) fueron: RPS (8.93%), pH (10.01%), M.O (14.83%), P (20.97%), K (37.06%), Ca (17.49%), Mg (23.40%) y Al+H (22.11%) respectivamente; para ensayos agrícolas los coeficientes de variación se consideran bajos cuando son inferiores a 10%, medios de 10 a 20%, altos cuando van de 20 a 30% y muy altos cuando son mayores al 30% (Pimentel, 1985; citado por GORDÓN y CAMARGO, 2015).

Al realizar la prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$) (Cuadro 20) con relación a la RPS se concluye que no existen diferencias estadísticas significativas para tratamientos y bloques. El valor promedio determinado de resistencia a la penetración del suelo fue de 2.20 kg/cm² (Cuadro 34); según SELLÉS *et al.* (2012) este valor de resistencia corresponde a una categoría baja por encontrarse dentro del intervalo 1.02 kg/cm² – 10.20 kg/cm². El valor bajo de resistencia a la penetración del suelo obtenido en el presente estudio puede deberse al contenido medio de materia (2.97%), baja presencia de carbonatos, ausencia de compactación vertical y también por ausencia de obstáculos como piedras y finalmente otro factor que podría haber influenciado en el resultado sería la humedad del suelo. La textura del suelo fue franco arcilloso, con una densidad aproximada de 1.30 g/cm³ (MANSILLA, 2017). “Correlaciones altamente significativas y negativas muestran que los niveles altos de materia orgánica inciden en la disminución de la compactación de suelo” (SADEGHIAN *et al.*, 2000). DEMUNER *et al.* (2013) analizando un suelo con labranza convencional cuya densidad fue de 1.20 g/cm³, determinó un valor promedio de resistencia a la penetración de 15.20 kg/cm², valor

considerado como moderado (10.20 – 20.29 kg/cm²), los mismos autores afirman que este valor depende de las características físicas del suelo y del grado de humedad del mismo.

Respecto al pH se evidencia diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento T₃ (Dolomita 4.00 t/ha) y T₀ (Testigo). El mayor valor de pH alcanza el tratamiento T₃ (Dolomita 4.00 t/ha); todo material encalante incrementa el pH del suelo, la dolomita al disociarse en el suelo libera calcio, magnesio y carbonatos; el calcio reemplaza al hidrógeno y aluminio en los sitios de intercambio, liberando esos cationes hacia la solución del suelo. Los iones de aluminio se someten a una hidrólisis completa para formar hidróxido de aluminio insoluble, con la liberación de más iones de hidrógeno. Todos los iones de hidrógeno reaccionan con los carbonatos de la dolomita, formando ácido carbónico y finalmente este se disocia formando dióxido de carbono y agua; neutralizando por completo el hidrógeno, incrementando el pH del suelo (PLASTER, 2000). En la Figura 9 se observa una línea de tendencia lineal para la dolomita y una línea de tendencia polinómica de segundo grado para la dolomita + compost, cuyos coeficientes de determinación (R²) son 0.9964 y 1.00 respectivamente. El pH del suelo mostró una correlación positiva significativa al incrementarse los niveles de dolomita en el suelo, aplicados en los tratamientos T₂ (Dolomita 2.00 t/ha) y T₃ (Dolomita 4.00 t/ha); sin embargo, cuando a estos tratamientos se le adiciona 30.00 t/ha de compost el pH del suelo alcanza un punto máximo equivalente a 4.94 con una aplicación de 2.71 t de dolomita, a partir de este nivel el pH del suelo disminuye. El descenso del pH al aplicar dolomita + compost, podría estar relacionado al incremento de la materia orgánica (2.95%) como efecto del tratamiento T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha). La descomposición de la materia orgánica produce CO₂ por parte de los microorganismos del suelo, el dióxido de carbono reacciona con el agua y forma ácido carbónico y éste al disociarse libera hidrógenos. Las plantas de cosechas también acidifican los suelos de dos formas adicionales; la primera cuando las raíces captan los nutrientes de catión como el potasio, devuelven un número equivalente de iones de hidrógeno y la segunda forma está relacionada porque los agricultores cada año extraen calcio y magnesio en cada recogida de cosecha (PLASTER, 2000). “El pH es un parámetro

importante para definir la movilidad de los diferentes componentes minerales, ya que su valor influye directamente en la solubilidad de los cationes. En algunos los fijará, disminuyendo su solubilidad aparente, con lo que las plantas no podrán absorberlos y, por el contrario, en otros casos favorecerá su movilidad aumentando la solubilidad en el suelo, haciéndolos disponibles para las plantas o especies vegetales” (KRISHNAMURTI y NAIDU, 2003).

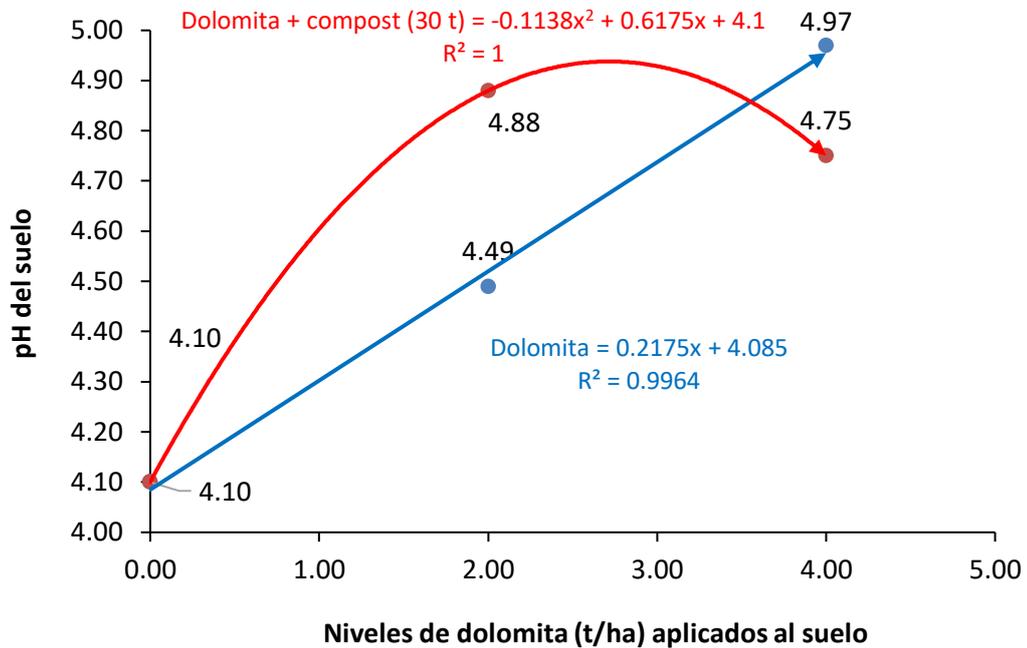


Figura 9. Correlación entre los niveles de dolomita y el pH del suelo.

Referente a la materia orgánica (M.O) se observa que los tratamientos T₁ (Compost 30.00 t/ha), T₂ (Dolomita 2.00 t/ha), T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha), T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) y T₀ (Testigo) estadísticamente son iguales; sin embargo, el tratamiento T₁ (Compost 30.00 t/ha) tiene un comportamiento estadístico diferente al tratamiento T₆ (Magnocal 3.00 t/ha). El tratamiento T₁ (Compost 30.00 t/ha) contiene el más alto porcentaje de materia orgánica (3.42%); esto se debe al aporte de carbono orgánico (11.01%) determinado en la composición química del compost, el magnocal tiene un aporte nulo de carbono orgánico (anexo, Figuras 28, 30). La Figura 10 muestra una correlación lineal positiva significativa entre la dolomita más la dosis de compost con la materia orgánica de suelo; es decir al incrementarse los niveles de dolomita + compost, el

porcentaje de materia orgánica del suelo aumenta progresivamente, el coeficiente de determinación (R^2) para esta línea de tendencia es de 0.8867. Para el caso de la dolomita sola la línea de tendencia es polinómica de segundo grado, es decir a medida que se incrementa los niveles de dolomita, la materia orgánica del suelo aumenta, hasta alcanzar su punto máximo que es de 3.42% con una aplicación de 2.71 t/ha de dolomita, a partir de este punto a mayor aplicación de dolomita, disminuye la materia orgánica del suelo. El coeficiente de determinación (R^2) para esta línea de tendencia es de 1.00 (PLASTER, 2000) menciona que la disponibilidad de nutrientes como calcio, magnesio y potasio en el suelo, provoca que los microorganismos se propaguen exponencialmente, digiriendo rápidamente los materiales orgánicos, y liberan dióxido de carbono y carbohidratos. Los compuestos fácilmente descompuestos, como los carbohidratos se consumen primero. Las largas cadenas de carbono se dividen en otras más cortas, los átomos adheridos se separan y se producen compuestos más simples. Algunos de estos compuestos simples reaccionan después para convertirse en humus.

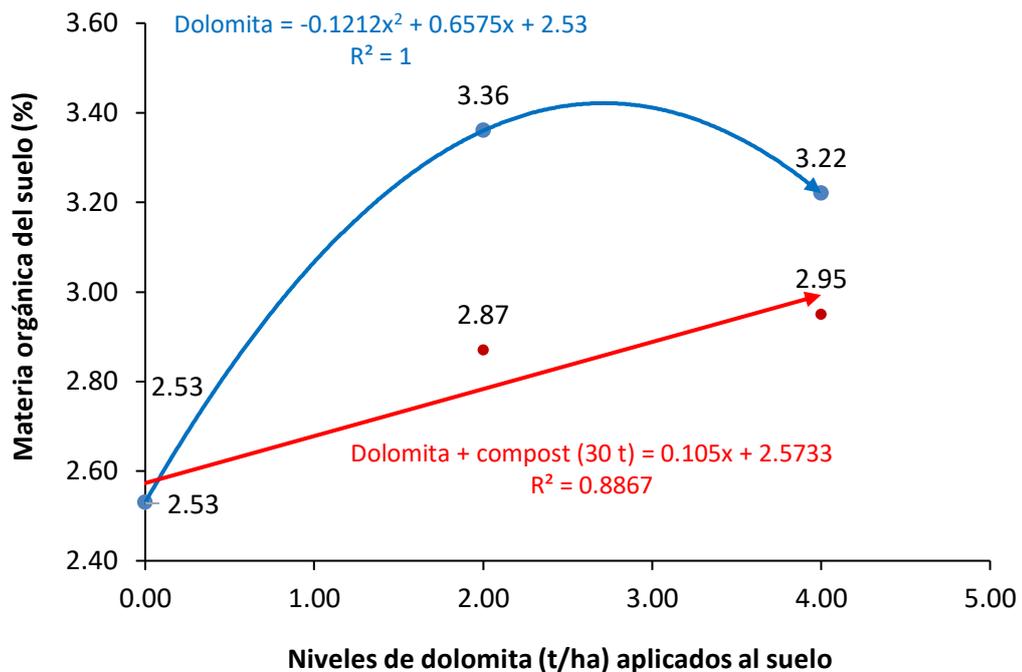


Figura 10. Correlación entre los niveles de dolomita y la materia orgánica del suelo.

Con relación al contenido de fósforo (P) se percibe que los tratamientos T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha), T₁ (Compost 30.00 t/ha), T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha), T₀ (Testigo), T₂ (Dolomita 2.00 t/ha) y T₆ (Magnocal 3.00 t/ha) presentan un comportamiento estadístico similar; sin embargo, el tratamiento T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) difiere estadísticamente del tratamiento T₃ (Dolomita 4.00 t/ha). El tratamiento T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) contiene el mayor valor de P (11.62 ppm) correspondiendo a un nivel medio (MANSILLA, 2017); el máximo valor de P obtenido estaría relacionado al contenido de la materia orgánica y al pH del suelo, dado el tratamiento T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) alcanzó el mayor valor de pH al adicionar compost + dolomita al suelo. PELLEGRINI (2017) afirma que la presencia de materia orgánica se encuentra dominada de cargas negativas posibilitando la formación de cationes hidroxilados con Fe y Al, combinaciones complejas que inmovilizan estos iones dejando en libertad a los iones fosfatos, incrementando el P disponible de los suelos. La participación del fósforo orgánico puede variar generalmente entre un 5 al 75% del P total mientras que en muchos suelos la partición es del 50%. El porcentaje dependerá de la actividad biológica (hongos, bacterias, levaduras, actinomicetos, micorrizas, etc.), temperatura, humedad, acidez y el grado de desarrollo del suelo.

En la Figura 11 se observa una línea de tendencia lineal para la dolomita y una línea de tendencia polinómica de segundo grado para la dolomita + compost, cuyos coeficientes de determinación (R^2) son 0.8282 y 1.00 respectivamente. El fósforo (P) del suelo evidenció una correlación negativa significativa al incrementarse los niveles de dolomita en el suelo, aplicados en los tratamientos T₂ (Dolomita 2.00 t/ha) y T₃ (Dolomita 4.00 t/ha); sin embargo, cuando a estos tratamientos se le adiciona 30.00 t/ha de compost el fósforo (P) del suelo alcanza un punto máximo equivalente a 11.70 ppm con una aplicación de 2.47 t de dolomita, a partir de este nivel el P del suelo comienza a disminuir.

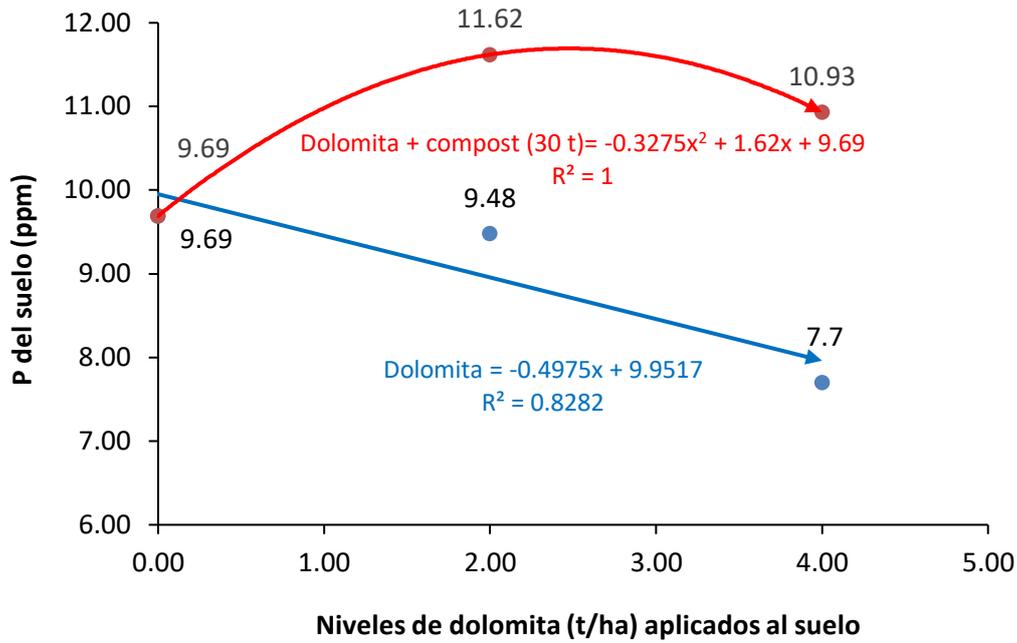


Figura 11. Correlación entre los niveles de dolomita y el fósforo del suelo.

En cuanto al contenido de potasio (K), se observa que los tratamientos T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha), T₁ (Compost 30.00 t/ha), T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha) y T₀ (Testigo) estadísticamente son iguales; sin embargo, el tratamiento T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) presenta un comportamiento estadístico diferente a los tratamientos T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), T₆ (Magnocal 3.00 t/ha) y T₂ (Dolomita 2.00 t/ha); el mayor contenido de potasio (102.95 ppm) logrado por el tratamiento T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) podría deberse al aporte de K de la fuente orgánica y al efecto múltiple de la dolomita, dado que al incrementar el pH del suelo aumenta la actividad microbiológica, produciendo ácidos orgánicos suaves los cuales disuelven minerales del suelo, haciéndolos disponibles para la plantas; además el incremento del pH provoca la deprotonación de los grupos funcionales de la arcillas las cuales capturan cationes como el K y Na reteniéndolos en sus superficies minerales, evitando su pérdida por lavado o lixiviación principalmente en suelos tropicales (PLASTER, 2000). En Italia, PINAMONTI (1998) usando compost como mulch en viñedos, encontró un incremento del contenido de materia orgánica, de fósforo disponible y potasio del cambio en el suelo.

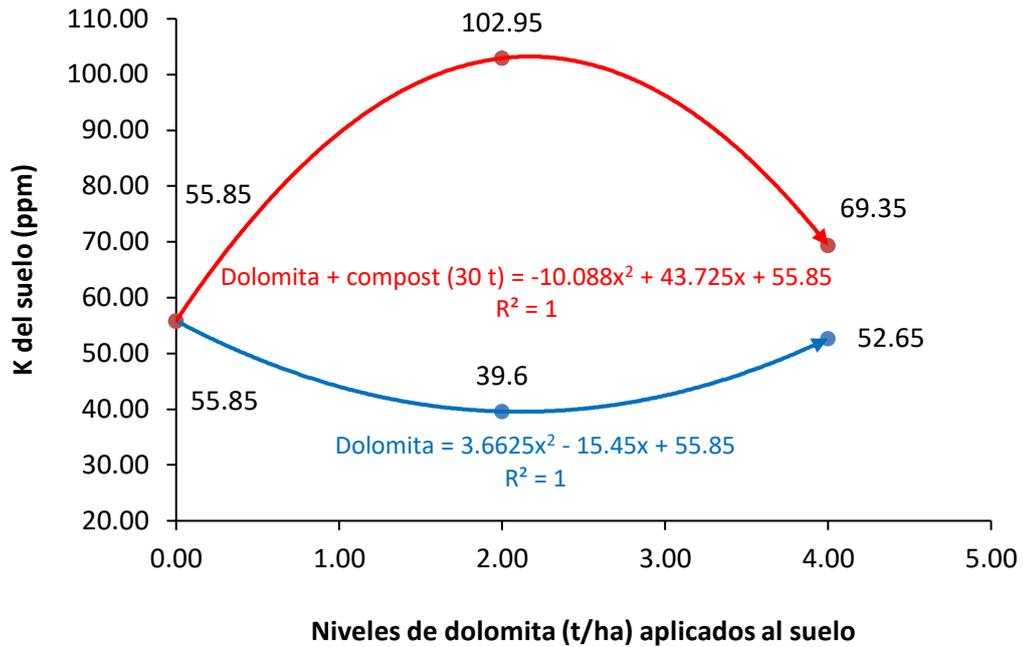


Figura 12. Correlación entre los niveles de dolomita y el potasio del suelo.

La Figura 12 muestra una línea de tendencia polinómica de segundo grado para la dolomita y a la vez también para la dolomita + la dosis de compost, cuyos coeficientes de determinación (R^2) son 1.00 y 1.00 respectivamente. El K del suelo disminuyó al incrementarse los niveles de dolomita aplicados en los tratamientos T₂ (Dolomita 2.00 t/ha) y T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), hasta alcanzar un punto mínimo igual a 39.55 al aplicar 2.10 t/ha de dolomita, a partir de este punto el K del suelo se incrementa; sin embargo, cuando a estos tratamientos se le adiciona 30 t/ha de compost el K del suelo alcanza un punto máximo equivalente a 103.26 ppm con una aplicación de 2.17 t de dolomita, a partir de este nivel el K del suelo disminuye.

Analizando el contenido de calcio (Ca) se percibe que los tratamientos T₁ (Compost 30.00 t/ha), T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha), T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha), T₂ (Dolomita 2.00 t/ha) y T₆ (Magnocal 3.00 t/ha) presentan el mismo comportamiento estadístico; sin embargo, los tratamientos T₁ (Compost 30.00 t/ha) y T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) son estadísticamente diferentes al tratamiento T₀ (Testigo); el contenido de calcio de estos tratamientos es diferente con respecto al testigo, debido probablemente al aporte individual del

compost y de la dolomita al producirse la disolución del carbonato (CaCO_3), el contenido máximo de calcio (2.36 meq/100 g) lo alcanzó el tratamiento T_1 (Compost 30.00 t/ha), considerado como bajo (< 4.00 meq/100 g) (CERDAS, 2012). ESPINOSA y MOLINA (1999) demostraron que, al adicionar calcio al suelo, se logró incrementar el contenido de calcio en el mismo.

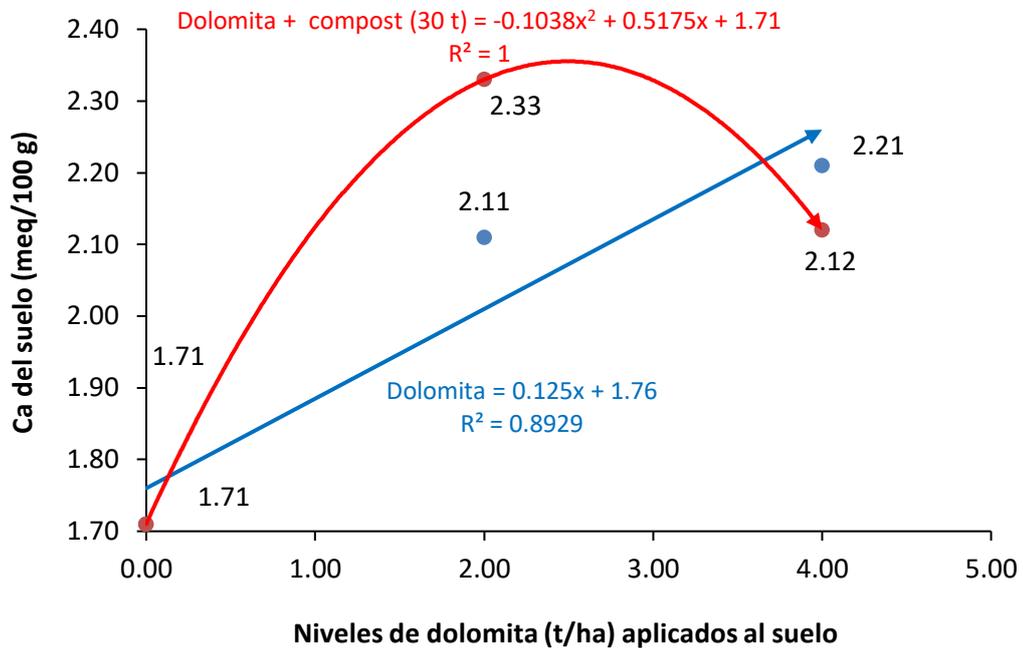


Figura 13. Correlación entre los niveles de dolomita y el calcio del suelo.

En la Figura 13 se nota una línea de tendencia lineal para la dolomita y una línea de tendencia polinómica de segundo grado para la dolomita + compost, cuyos coeficientes de determinación (R^2) son 0.8929 y 1.00 respectivamente. El Ca del suelo mostró una correlación positiva significativa al incrementarse los niveles de dolomita en el suelo, aplicados en los tratamientos T_2 (Dolomita 2.00 t/ha) y T_3 (Dolomita 4.00 t/ha); sin embargo, cuando a estos tratamientos se le agrega 30 t/ha de compost el Ca del suelo obtiene un punto máximo equivalente a 2.34 meq/100 g con una aplicación de 2.49 t de dolomita, a partir de este nivel el Ca del suelo disminuye.

Para magnesio (Mg), se visualiza que los tratamientos T_3 (Dolomita 4.00 t/ha), T_5 (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha), T_4 (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha), T_2 (Dolomita 2.00 t/ha), y T_1 (Compost 30.00 t/ha) son

estadísticamente diferentes a los tratamientos T₀ (testigo) y T₆ (Magnocal 3.00 t/ha). El mayor contenido de Mg lo logró el tratamiento T₃ (Dolomita 4.00 t/ha) con 1.52 meq/100 g; la dolomita en su composición química contiene 20.58% de óxido de magnesio (anexo, Figura 36) lo cual estaría aportando Mg al suelo en una proporción mayor que los otros tratamientos.

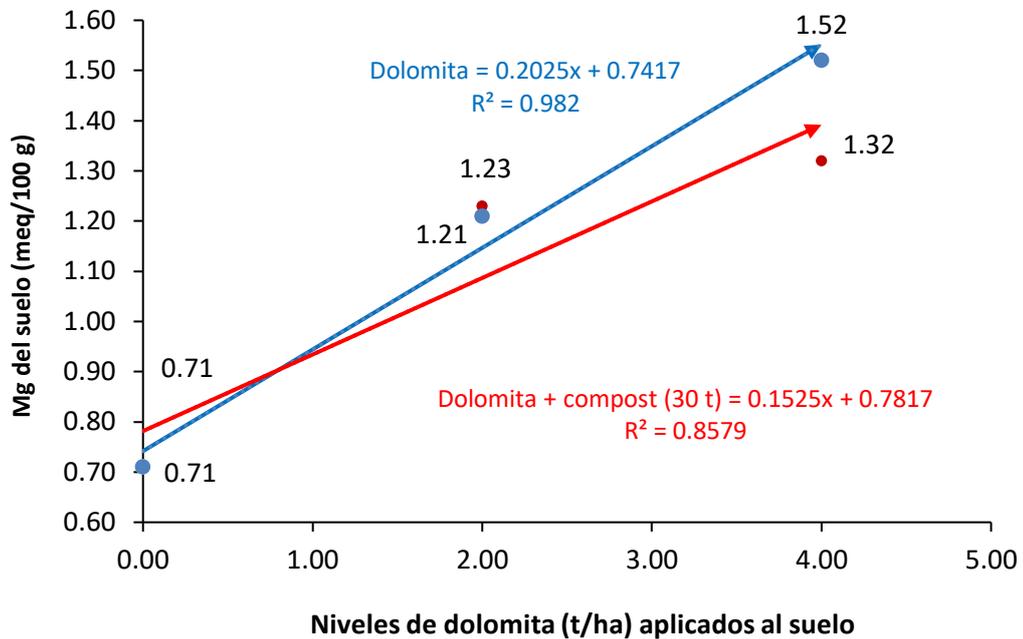


Figura 14. Correlación entre los niveles de dolomita y el magnesio del suelo.

La Figura 14 indica una correlación lineal positiva significativa para la dolomita y a la vez también para la dolomita + la dosis de compost con respecto al Mg del suelo, cuyos coeficientes de determinación (R²) son 0.8579 y 0.982 respectivamente. El Mg del suelo aumenta al incrementarse los niveles de dolomita aplicados al suelo en los tratamientos T₂ (Dolomita 2.00 t/ha), T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) y T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha).

Respecto al Al + H; los tratamientos T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) y T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), tuvieron mayor efecto en la disminución de la acidez cambiabile; dichos tratamientos también alcanzaron el más alto nivel de pH, coincidiendo que a mayor pH menor acidez.

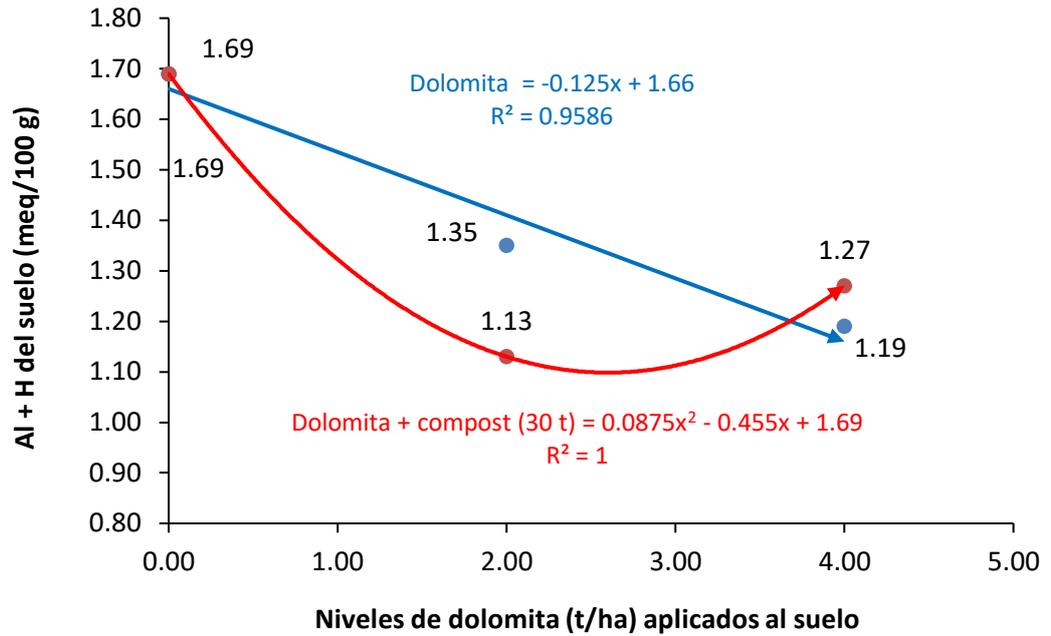


Figura 15. Correlación entre los niveles dosis de dolomita y el Al + H del suelo

En la Figura 15 se observa una línea de tendencia polinómica de segundo grado para la dolomita + la dosis de compost, cuyo coeficiente de determinación (R^2) es 1.00. El Al + H del suelo disminuyó al incrementarse los niveles de dolomita + la dosis de compost aplicados en los tratamientos T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) y T₅ (Compost 30 t/ha + dolomita 4.00 t/ha) respectivamente, hasta alcanzar un punto mínimo igual a 1.10 meq/100 g al aplicar 2.60 t/ha de dolomita, a partir de este punto el AL + H del suelo se incrementa. Con respecto a las dosis de dolomita sola se nota que existe una correlación lineal negativa significativa, cuyo coeficiente de determinación (R^2) es 0.9586, es decir al aumentar los niveles de dolomita en el suelo, disminuye progresivamente los niveles de Al + H.

Referente a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo se visualiza diferencia estadística significativa entre los tratamientos T₃ (Dolomita 4.00 t/ha), T₆ (Magnocal 3.00 t/ha) y T₀ (Testigo); el tratamiento T₃ alcanzó una CIC de 5.24 meq/100 g (nivel bajo) (MANSILLA, 2017), el aumento de la capacidad de intercambio catiónico podría deberse al efecto del pH, el tratamiento obtuvo el mayor valor de pH equivalente a (4.97). El incremento del pH en el suelo genera cargas negativas producto de la desprotonación de los

grupos funcionales de las arcillas (aluminol, silanol) y la materia orgánica (carboxilo, oxidrilo, fenoles, aminas, amidas, aldehído, carboxilato, cetona, carbonilo, éter, éster, imino, péptido, anhídrido, quinona, hidroquinona, cetoácido,) (CARRASCO, 1972). En la Figura 16 se observa una línea de tendencia lineal para la dolomita y una línea de tendencia polinómica de segundo grado para la dolomita + compost, cuyos coeficientes de determinación (R^2) son 0.977 y 1.00 respectivamente. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo mostró una correlación positiva significativa al incrementarse los niveles de dolomita en el suelo, aplicados en los tratamientos T_2 (Dolomita 2.00 t/ha) y T_3 (Dolomita 4.00 t/ha); sin embargo, cuando a estos tratamientos se le adiciona 30.00 t/ha de compost la capacidad de intercambio catiónico del suelo alcanza un punto máximo (5.22 meq/100 g) aplicando 2.71 t de dolomita, a partir de este nivel la capacidad de intercambio catiónico del suelo comienza a disminuir.

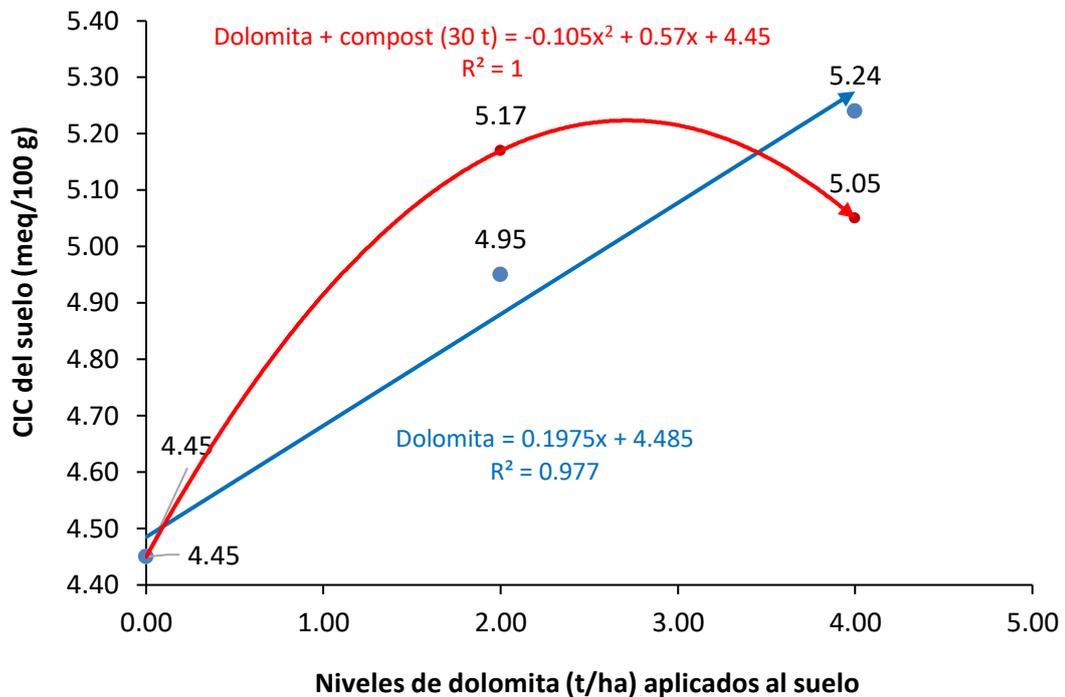


Figura 16. Correlación entre los niveles de dolomita y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC).

Cuadro 19. Cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para resistencia a la penetración del suelo (RPS), pH, materia orgánica (M.O), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio más hidrógeno (Al + H) y CIC del suelo.

Fuente de variación	GL	RPS		pH		M.O		P		K		Ca		Mg		Al + H		CIC	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
		Tratamiento	6	0.05	NS	0.49	S	0.58	S	7.98	S	2258.00	S	0.24	S	0.38	S	0.22	S
Bloque	3	0.04	NS	0.24	NS	0.09	NS	0.38	NS	910.91	NS	0.08	NS	0.05	NS	0.08	NS	0.16	NS
Error	18	0.04		0.21		0.19		4.38		594.73		0.13		0.07		0.09		0.14	
Total	27																		
CV (%)		8.93		10.01		14.83		20.97		37.06		17.49		23.40		22.11		7.51	

Leyenda:

S = Significativo

NS = No significativo

Cuadro 20. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para resistencia a la penetración del suelo (RPS), pH, materia orgánica (M.O), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio más hidrógeno (Al + H) y CIC del suelo por tratamiento en estudio.

RPS (kg/cm ²)			pH (1:1)			M.O (%)			P (ppm)			K (ppm)			Ca (meq/100 g)			Mg (meq/100 g)			Al+H (meq/100 g)			CIC (meq/100 g)		
Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	Clave	Sig.	
T ₄	2.33	a	T ₃	4.97	a	T ₁	3.42	a	T ₄	11.62	a	T ₄	102.95	a	T ₁	2.36	a	T ₃	1.52	a	T ₆	1.69	a	T ₃	5.24	a
T ₅	2.29	a	T ₄	4.88	a b	T ₂	3.36	a	T ₁	11.40	a	T ₁	92.45	a b	T ₄	2.33	a	T ₅	1.32	a	T ₀	1.69	a	T ₄	5.17	a
T ₆	2.27	a	T ₁	4.80	a b c	T ₃	3.22	a b	T ₅	10.93	a b	T ₅	69.35	a b c	T ₃	2.21	a b	T ₄	1.23	a	T ₂	1.35	a b	T ₁	5.16	a
T ₂	2.24	a	T ₅	4.75	a b c	T ₅	2.95	a b c	T ₀	9.69	a b	T ₀	55.85	b c	T ₅	2.13	a b	T ₂	1.21	a	T ₅	1.27	a b	T ₅	5.05	a b
T ₁	2.17	a	T ₂	4.49	a b c	T ₄	2.87	a b c	T ₂	9.48	a b	T ₃	52.65	c	T ₂	2.11	a b	T ₁	1.15	a	T ₁	1.21	a b	T ₂	4.95	a b
T ₃	2.13	a	T ₆	4.15	b c	T ₀	2.53	b c	T ₆	9.07	a b	T ₆	47.75	c	T ₆	1.82	a b	T ₀	0.71	b	T ₃	1.19	b	T ₆	4.52	b
T ₀	2.02	a	T ₀	4.10	c	T ₆	2.48	c	T ₃	7.70	b	T ₂	39.60	c	T ₀	1.71	b	T ₆	0.70	b	T ₄	1.13	b	T ₀	4.45	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes

Leyenda:

T₀ = Testigo

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

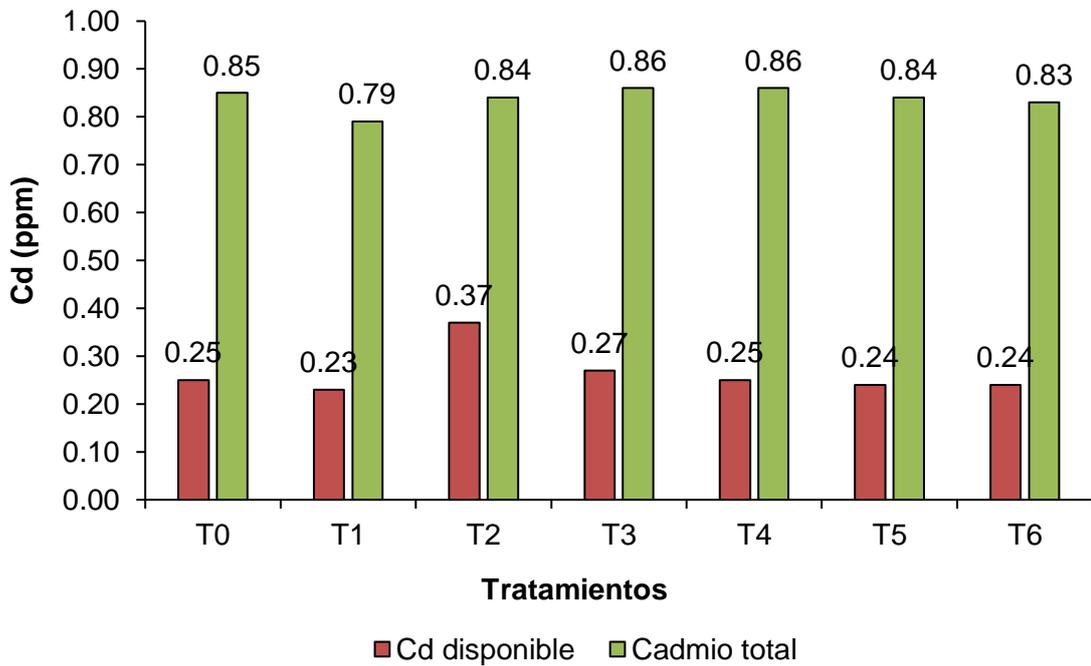
T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

4.2. CADMIO EN EL SUELO Y GRANO DE CACAO

En la Figura 17 se muestra los contenidos de cadmio disponible y total del suelo, el tratamiento T₃ (Dolomita 4.00 t/ha) evidencia el más alto contenido de cadmio total (0.86 ppm), probablemente se debe a sus mayores valores de CIC y pH alcanzados, cuyos valores fueron 5.24 meq/100 g y 4.97. Las partículas de arcilla y los altos porcentajes de materia orgánica, juegan un papel importante en la retención de metales traza como el cadmio; existe afinidad de los ácidos húmicos y fúlvicos contenidos en la materia orgánica por este elemento (BARRAGÁN, 2008). Al incrementarse el pH del suelo se genera la deprotonación de los grupos funcionales de las arcillas (–Al-OH, aluminol y –Al-Si-OH, silanol) y la materia orgánica, lo cual incrementa la CIC y por consiguiente los coloides del suelo pueden adsorber una mayor cantidad de cationes, entre ellos metales pesados (MEJÍA, 2006). “Suelos ligeramente ácidos, con un contenido mediano de materia orgánica y con arcillas de cargas negativas variables y permanentes, además de una alta CIC, indicador de una capacidad elevada para retener cationes en los sitios de intercambio; propiedades que le atribuyen al suelo una alta capacidad de adsorción de cadmio” (SÁNCHEZ *et al.*, 2011). Rashid (1971) citado por REYES y BARRETO (2011), encontró que 1/3 parte de la capacidad total de enlace de los elementos con la materia orgánica se debe a la CIC, y las 2/3 partes dependen de las posiciones disponibles que existan como sitios de acomplejación. El nivel promedio de cadmio total del suelo determinado en el presente estudio fue de 0.84 ppm, no superó el estándar ambiental para suelo agrícola de la legislación peruana que es de 1.40 ppm de Cd total (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2013). La Unión Europea establece que el valor límite de concentración de cadmio en suelos agrícolas es de 1-3 ppm (materia seca de suelo a pH 6-7) (SANTIAGO, 2013). (GONZÁLEZ, 2010) al analizar 10 muestras de suelos cacaoteros, determino en promedio 2.14 ppm de cadmio total. De igual modo un estudio realizado en Venezuela, donde se analizó 5 muestras de suelo utilizados para la producción de cacao, se obtuvo en promedio 1.31 ppm de Cd total (CONTRERAS, 2005). SÁNCHEZ *et al.* (2011) al analizar dos suelos de uso agrícola determinaron en promedio 0.10

ppm de cadmio disponible y a la vez determinaron que la aplicación de fosfato diamónico $[(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$ disminuyó el contenido de cadmio disponible del suelo. El contenido de cadmio de un suelo depende del material parental y de las prácticas de manejo del suelo (GONZÁLEZ, 2010).



Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

Figura 17. Cadmio disponible y total en el suelo por tratamiento en estudio.

En la Figura 18 se indica los contenidos promedios de cadmio disponible y cadmio total determinados en el suelo, el cadmio disponible representa 30.95% del cadmio total. REYES y MARÍA (2004) “al evaluar el contenido de metales pesados en el cultivo de cacao orgánico en Centro América (República Dominicana) determinaron que el Cd disponible representó el 33% del Cd total”. “Teniendo en cuenta la referencia del comité mixto OMS - FAO (1992) se puede determinar cómo valor máximo permitido 0.99 ppm de cadmio disponible en el suelo” (CÁRDENAS, 2012).

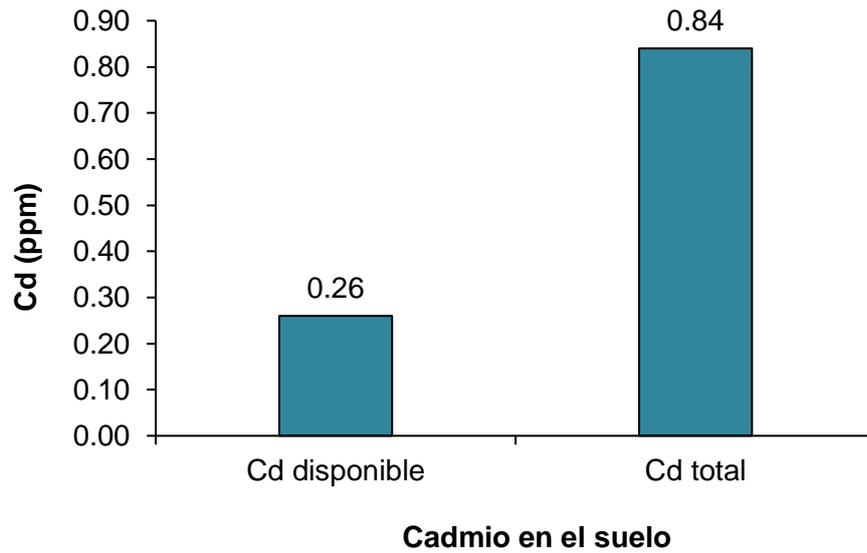
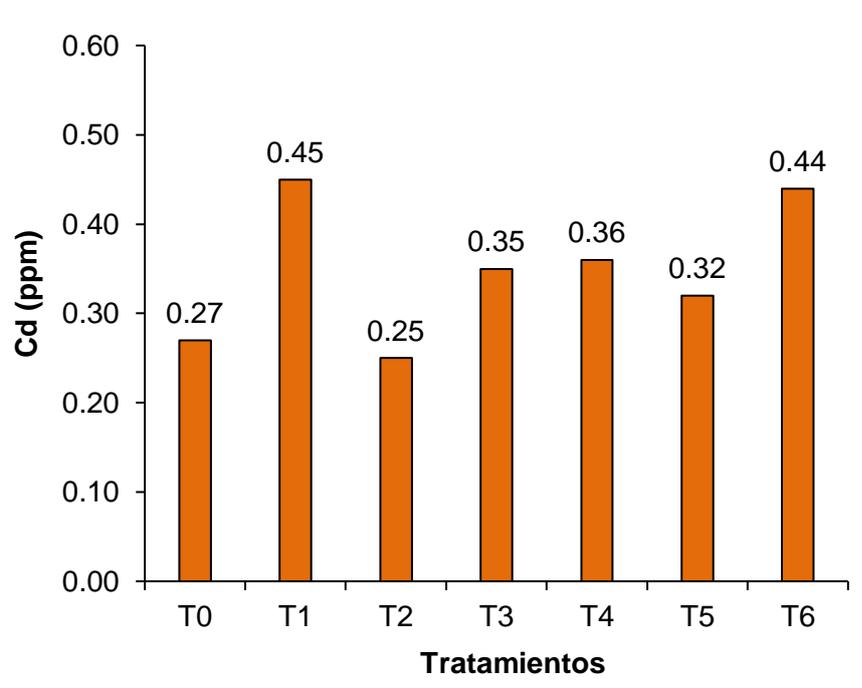


Figura 18. Cadmio disponible y total promedio en el suelo

HUAMANÍ *et al.* (2012) analizando el contenido de Cd y Pb disponible de 22 suelos de plantaciones de cacao orgánico en las regiones de Huánuco y Ucayali, Perú, obtuvo valores promedio de 0.53 y 3.02 ppm; el contenido de cadmio difiere al valor obtenido en el presente estudio, probablemente a la influencia de las características físicas y químicas del suelo como textura, materia orgánica, pH, CIC, macro y microelementos. CÁRDENAS (2012) “en parcelas de cacao orgánico de la región Huánuco, Perú; encontró que los mayores valores de cadmio disponible en el suelo (1.82 y 1.63 ppm) se presentaban en las riberas de los ríos Huallaga y Tulumayo, respectivamente”.

Con respecto a los contenidos de cadmio en el suelo (disponible y total) y cadmio total en el grano de cacao, no se evidenció diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en estudio, según el análisis de variancia (ANVA) y prueba de Duncan (anexo Cuadros 30, 31). La Figura 19 muestra el contenido de cadmio total en el grano de cacao; numéricamente el tratamiento que más redujo el contenido de cadmio fue el tratamiento T₂ (Dolomita 2.00 t/ha) alcanzando 0.25 ppm; este resultado estaría relacionado posiblemente al contenido de materia orgánica logrado, equivalente a 3.36%, influenciado por sus valores de pH, Ca, Mg y CIC. “La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales que pueden quedar como no disponibles para

las plantas” (SÁNCHEZ, 2010). “En suelos ácidos, la materia orgánica del suelo puede controlar fuertemente la solubilidad del cadmio” (BELTRÁN, 2001). “La composición de la materia orgánica y la fase mineral del suelo, son las que influyen significativamente en la especiación del Cd; por ejemplo, suelos con altos contenidos de materia orgánica u óxidos de hierro adsorben más Cd que los que tienen grandes cantidades de arcillas tipo 2:1, aunque tengan alta CIC” (REYES y BARRETO, 2011). PÉREZ (2006) ha estudiado el efecto de la adsorción sobre Cd, Cu, Pb y Zn simultáneamente de la materia orgánica de los suelos, sugiriendo que un mayor contenido en materia orgánica incrementa la retención del Cd sobre el Zn. En general se evidencia contenidos bajos de cadmio en todos los tratamientos, en promedio se registró 0.35 ppm de cadmio en el grano de cacao (almendra), valor menor al establecido por la Unión Europea, la cual estipula como contenido máximo permisible 0.50 ppm (Más y Azcue, 1993; citados por GARCÍA y DORRONSORO, 2002).



Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

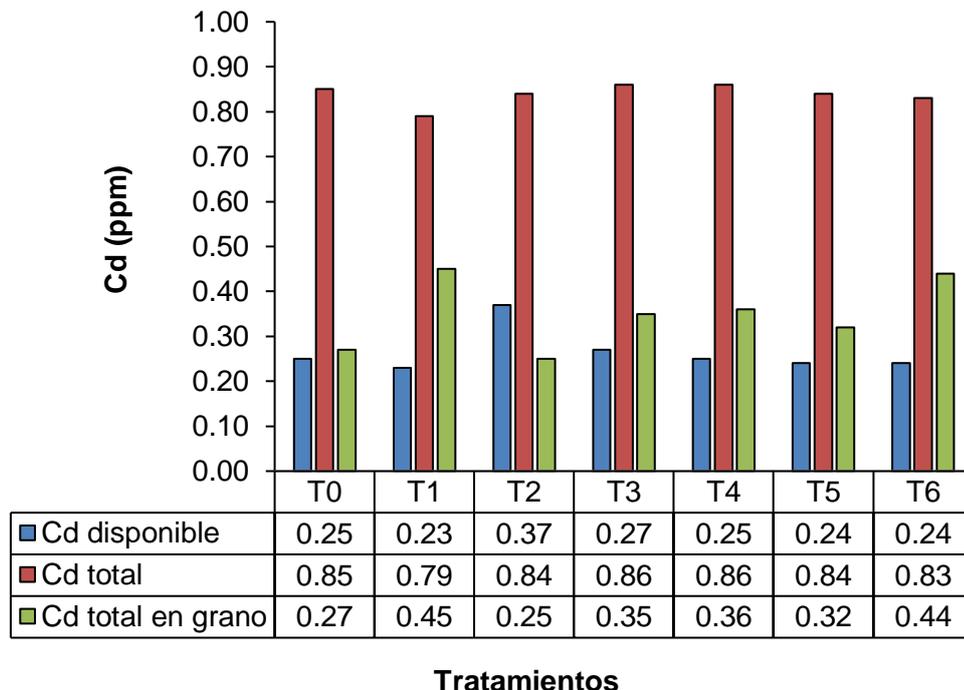
T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

Figura 19. Cadmio total en el grano de cacao por tratamiento en estudio.

En la Figura 20 se aprecia los contenidos de cadmio disponible y total en el suelo comparados con el cadmio en el grano; en promedio el contenido de cadmio en el grano (0.35 ppm) es mayor al contenido de cadmio disponible del suelo (0.26 ppm), alcanzando una tasa de transferencia de 1.35 para Cd disponible y 0.42 para cadmio total. “La tasa de transferencia de cadmio depende de los índices de depósito, tipo de suelo y la planta, el pH del suelo, contenido de materia orgánica, el tratamiento del suelo con fertilizantes (Ca, Zn)” (FAO, 2012). Alloway (1995) citado por CALDERON y CONCHA (2002) manifiesta que existe una tasa de transferencia de cadmio del suelo a las plantas en un intervalo de 1-10. Los metales pesados tienen la característica de bioacumularse en los seres vivos. “La bioacumulación ocurre en el organismo de un ser vivo, ya sea porque el producto es absorbido más rápidamente de lo que puede ser utilizado o porque no puede ser metabolizado” (REVOREDO, 2018). En función a la acumulación, las plantas se clasifican como hiperacumuladoras y exclusoras. Para que las plantas sean consideradas como hiperacumuladoras, deben contener en su parte aérea concentraciones superiores a: 100 mg/kg para Cd, 1000 mg/kg para Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb y 10000 mg/kg para Zn y Mn (RIFFO, 2016). Por lo tanto, el índice de bioacumulación dependerá a su vez de la biodisponibilidad y de la concentración de los metales en el suelo, así como del tipo de planta verde y de su capacidad para bioacumular (CAHUASQUI, 2011). En términos generales podemos afirmar que la planta de cacao no es una planta hiperacumuladora de cadmio, presenta características de una planta exclusora, según las tres características antes mencionadas. No existe una correlación directa entre el contenido de cadmio del suelo y el cadmio en la almendra de cacao (METRO *et al.*, 2019).

El tratamiento T₂ presenta el mayor contenido de cadmio disponible, el cual puede ser absorbido por la planta; sin embargo, este tratamiento presenta el menor contenido de cadmio en el grano, probablemente se debe a su mayor contenido de materia orgánica (3.36%) la cual está reteniendo al cadmio, esto se corrobora al mayor contenido de cadmio total (0.78 ppm) determinado en la

fracción física de la materia orgánica de este tratamiento. “La materia orgánica y los óxidos de Fe y Mn favorecen la retención de cadmio en el suelo y disminuyen su absorción por las plantas” (BARRAGÁN, 2008). Rashid (1971), citado por REYES y BARRETO (2011), encontró que la tercera parte de la capacidad total de enlace de los elementos con la materia orgánica se debe a la CIC, y las dos terceras partes dependen de las posiciones disponibles que existan como sitios de acomplejación Stevenson (1982) citado por REYES y BARRETO (2011) “manifiesta que los enlaces de los metales en el suelo obedecen a atracciones electrostáticas, interacciones ión-dipolo y formación de complejos. Por lo general, en el suelo los metales pesados pueden unirse a diferentes ligandos orgánicos e inorgánicos para formar complejos, razón por la que los cationes polivalentes desempeñan un importante papel en la agregación y coagulación de materia orgánica y coloides minerales”.



Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

Figura 20. Cadmio en el suelo y cadmio total en el grano de cacao.

Con la finalidad de conocer la relación entre el cadmio (suelo, grano) y las características químicas del suelo (pH, M.O., P, K, Ca, Mg, Al+H) se ejecutó el análisis de correlación de Pearson (Cuadro 21).

Cuadro 21. Correlación de Pearson entre el cadmio del suelo y cadmio total del grano con respecto a las características químicas del suelo.

Variable	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al+H	CIC	Cadmio disponible	Cadmio total
Cadmio disponible	0.12	0.16	0.18	0.16	-0.04	0.09	-0.14	-0.12		
Cadmio total	0.22	-0.19	-0.33	-0.19	-0.05	0.28	0.01	0.15	-0.07	
Cadmio granos	0.12	0.19	-0.19	0.19	0.17	-0.13	-0.12	-0.08	-0.09	-0.17

(*) La correlación es significativa en el nivel 0.05

(**) La correlación es significativa en el nivel 0.01

En el análisis de correlación de Pearson, se observa una correlación positiva entre el contenido de cadmio disponible con pH, M.O., P, K y Mg y una correlación negativa con Ca, Al+H y CIC. Con respecto al contenido de cadmio total se observa una relación positiva con el pH, Mg, Al+H, CIC y correlación negativa con M.O., P, K, Ca y cadmio disponible. Para cadmio en granos de cacao se evidencia correlación positiva con el pH, M.O., K, Ca y correlación negativa con P, Mg, Al+H, CIC, cadmio disponible y cadmio total; sin embargo, ninguna correlación es significativa para las tres variables a un nivel de significación de $\alpha = 0.05$.

4.3. CADMIO EN LA FRACCIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA

4.3.1. CADMIO EN LA FRACCIÓN FÍSICA DE LA MATERIA ORGÁNICA

En el Cuadro 22 se presenta los resultados del análisis de cadmio total en la fracción física de la materia orgánica, los valores promedio

son: fracción liviana libre (FLL) 0.454 ppm, fracción liviana oclusa (FLO) 0.275 ppm y fracción pesada (FP) 0.027 ppm. El orden de fijación del cadmio en la fracción física de la materia orgánica fue FLL>FLO>FP.

El mayor contenido de cadmio en la fracción FLL podría estar relacionado a la mayor presencia de materiales orgánicos, restos de insectos en proceso de descomposición que fueron retenidos o absorbidos, por los organismos presentes en el suelo y estarían formando parte un grupo orgánico amplio entre carbohidratos, y otros compuestos fenólicos, es decir, esta materia orgánica sería más reactiva y estaría formando compuestos activos en distintos grupos funcionales de carbono aromático, alquilo, carbonilo, y ácidos carboxílicos. La fracción liviana libre se compone de materiales orgánicos derivados principalmente de restos de plantas, pero que contiene una cantidad razonable de residuos microbianos, incluyendo hifas de hongos, esporas, esqueletos, bolitas fecales, fragmentos de raíces y semillas (GOLCHIN, 1997). Otra explicación al mayor contenido de cadmio en la FLL, podría obedecer a la presencia mayoritaria de microorganismos en esta fracción del suelo. “Los metales se unen a la superficie celular de los hongos y bacterias a través de mecanismos que incluyen interacciones electrostáticas, fuerzas de Van de Waals, unión covalente, interacciones redox, precipitación extracelular o la combinación de esos procesos; los grupos cargados negativamente (carboxil, hidroxil y fosforil) de la pared celular bacteriana adsorben los iones metálicos y estos son retenidos” (RAJENDRAN *et al.*, 2003). “La FLL es más reactiva (GREGORICH *et al.*, 2006). Cuando los metales (calcio, hierro, potasio, cobre, cadmio, plomo, estaño, mercurio, cobalto, arsénico, magnesio, etc.) se unen a la superficie celular de hongos y bacterias pueden bioacumularse. La bioacumulación es un proceso celular que involucra un sistema de transporte de membrana que internaliza el metal pesado presente en el entorno celular con gasto de energía, este consumo energético se realiza a través de la H⁺-ATPasa; una vez incorporado el metal pesado al citoplasma este es secuestrado por proteínas (metalotioneinas, fitoquelatinas) y vacuolas” (MARRERO *et al.*, 2010).

Cuadro 22. Cadmio total promedio en la fracción física de la materia orgánica.

Clave	Cadmio total (ppm) (USEPA-3050B)		
	Fracción física		
	Fracción liviana libre (FLL)	Fracción liviana oclusa (FLO)	Fracción pesada (FP)
T ₀	0.473	0.231	0.037
T ₁	0.425	0.286	0.003
T ₂	0.458	0.311	0.003
T ₃	0.435	0.228	0.038
T ₄	0.427	0.261	0.07
T ₅	0.503	0.277	0.038
T ₆	0.454	0.333	0.003
(*)	0.454	0.275	0.027

(*) = promedio

Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

La mayor concentración de cadmio total expresado en porcentaje se encontró en la FLL con 60.05%, seguido de la FLO con 36.38% y en menor cantidad en la FP con 3.57% (Figura 21). Estos resultados son muy similares a los obtenidos por OTTOS (2018), quien al analizar 20 muestras de suelo determinó en promedio en la fracción liviana libre (FLL) 62.74%, fracción liviana oclusa (FLO) 32.59 % y en la fracción pesada (FP) 4.66% de cadmio total. La FLO comprende un grupo diverso de compuestos orgánicos, incluidos los restos de plantas, estructuras fecales, polen, cutícula de insectos y estructuras de la raíz y hongos con un tamaño reducido y un grado de descomposición más avanzado en comparación con la fracción liviana libre (CHRISTENSEN, 2000). La FP se compone de materiales orgánicos en avanzado estado de descomposición, no identificable visualmente, fuertemente ligada fracción mineral (CHRISTENSEN, 2000). Se cree que esta fracción está

dominada, por los compuestos orgánicos de alta recalcitrancia, como remanentes de la cutina y suberina, por lo como material resistente, sintetizada por microorganismos durante el proceso de descomposición (BALDOCK *et al.*, 1992). Las fracciones más humificadas tienen casi siempre la menor CIC comparada con fracciones menos humificadas, por lo tanto, menor capacidad de retención de metales (Flaig *et al.*, 1975; citado por SERRANO, 2000).

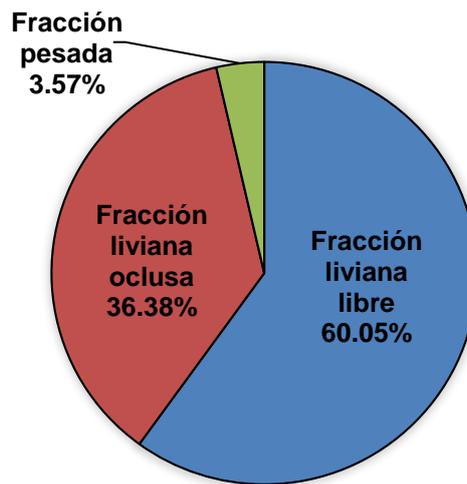


Figura 21. Cadmio total en la fracción física de la materia orgánica.

En el Cuadro 23, se indica los cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para el contenido de cadmio total en la fracción física de la materia, según la prueba de F ($\alpha = 0.05$); se percibe que existe diferencias estadísticas significativas en la fracción liviana oclusa (FLO) entre tratamientos y bloques; cuyo coeficiente de variación es 18.57%. Con respecto a la fracción liviana libre (FLL) y fracción pesada (FP) no existe diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, cuyos coeficientes de variación son 23.94% y 38.67% respectivamente; según (Pimentel, 1985; citado por GORDÓN y CAMARGO, 2015) manifiestan que para ensayos agrícolas los coeficientes de variación se consideran bajos cuando son inferiores a 10%, medios de 10 a 20%, altos cuando van de 20 a 30% y muy altos cuando son mayores al 30%.

Cuadro 23. Cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para el contenido de Cd total en la fracción física de la materia orgánica.

Fuente de variación	G.L.	Fracción física de la materia orgánica					
		Fracción liviana libre		Fracción liviana oclusa		Fracción pesada	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
Tratamiento	6	0.003	NS	0.010	S	0.0020	NS
Bloque	3	0.110	AS	0.010	S	0.0006	NS
Error	18	0.010		0.003		0.0020	
Total	27						
C.V (%)		23.94		18.57		38.67	

Leyenda:

S = Significativo
 NS = No significativo
 AS = Altamente significativo

La prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$) para cadmio en la fracción física de la materia orgánica, por tratamiento en estudio (Cuadro 24), confirma los resultados del ANVA, para el caso de las fracciones liviana oclusa y pesada los tratamientos presentan igual comportamiento estadístico. Para la fracción liviana oclusa se evidencia que los tratamientos T₆ (Magnocal 3.00 t/ha), T₂ (Dolomita 2.00 t/ha), T₁ (Compost 30.00 t/ha), T₅ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha) y T₄ (Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha) son estadísticamente iguales; sin embargo, el tratamiento T₆ (Magnocal 3.00 t/ha) presenta un valor estadístico diferente al tratamiento T₃ (Dolomita 4.00 t/ha). El mayor contenido de cadmio retenido por el tratamiento T₆ (Magnocal 3.00 t/ha) probablemente obedezca al aporte mayoritario de macro y micronutrientes (P, K, Ca, S, Mg, Na, Cu, Zn, Mn, Fe y B) del magnocal, estos elementos son utilizados por los microorganismos del suelo

para su metabolismo y reproducción, al incrementarse la población microbiana también se acelera el proceso de degradación de la materia orgánica. Al existir mayor cantidad de microorganismos estos podrían retener el cadmio. El mayor contenido de cadmio en el suelo también podría estar relacionado al aporte del magnocal dado que este contenía 36.85 ppm de cadmio (ver anexo: Figura 37). Según Jenkinson (1992) citado por MORA (2006) afirma que uno de los factores involucrados en la actividad microbiana es la disponibilidad de nutrientes inorgánicos, influyendo en la descomposición de los materiales orgánicos del suelo. La aplicación de materiales encalantes, favorecen la presencia de microorganismos deseables y el reciclaje del nitrógeno y otros nutrientes del suelo, mediante el incremento de la actividad biológica.

Cuadro 24. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para cadmio en la fracción física de la materia orgánica, por tratamiento en estudio.

Fracción física de la materia orgánica								
Fracción liviana libre			Fracción liviana oclusa			Fracción pesada		
Clave	ppm	Sig.	Clave	ppm	Sig.	Clave	ppm	Sig.
T ₅	0.51	a	T ₆	0.33	a	T ₄	0.07	a
T ₀	0.47	a	T ₂	0.31	a b	T ₅	0.04	a
T ₂	0.46	a	T ₁	0.29	a b c	T ₃	0.04	a
T ₆	0.46	a	T ₅	0.28	a b c	T ₀	0.04	a
T ₃	0.44	a	T ₄	0.26	a b c	T ₆	0.00	a
T ₄	0.43	a	T ₀	0.23	b c	T ₁	0.00	a
T ₁	0.43	a	T ₃	0.23	c	T ₂	0.00	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes

Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

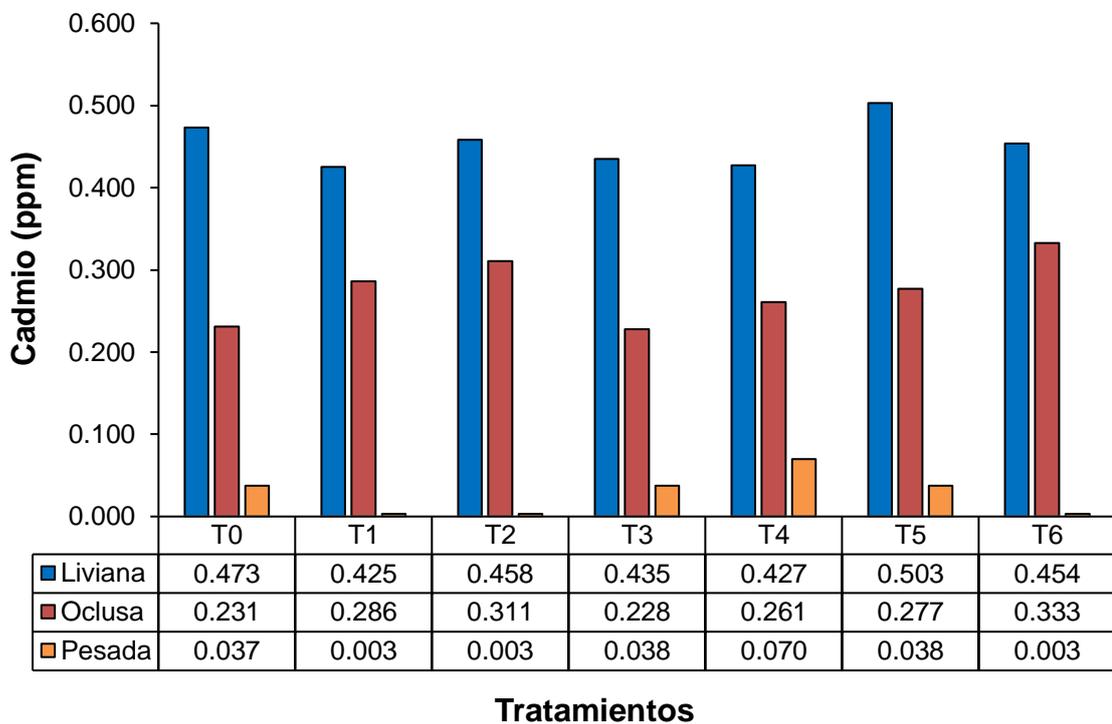
T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

Contenidos de cadmio total en la fracción física de la materia orgánica (Figura 22), en general todos los tratamientos en estudio muestran un mayor contenido de cadmio en la FLL, seguida de la FLO y finalmente la FP; ésta última fracción contiene los menores contenidos de cadmio, factiblemente a la ausencia de cargas negativas, como consecuencia de la formación del complejo arcillo húmico. Christensen (1992) citado por ZAGAL *et al.* (2002) manifiesta que la FP corresponde a la materia orgánica del suelo (MOS) incorporada en complejos organominerales, asociada a las partículas primarias de arcilla, limo y arena. Es aquella que se encuentra más transformada y además tiene menor CIC que la FLL y la FLO. Constituye hasta 30-50% de la MOS.



Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

Figura 22. Cadmio total en la fracción física de la materia orgánica, en función a los tratamientos en estudio.

“La fracción liviana libre (FLL) es la materia orgánica del suelo (MOS) no firmemente asociada a los minerales del suelo, considerada como los residuos de plantas y animales a ser descompuestos con mayor rapidez. Posee una relación C/N más alta que el suelo, con valores aproximados entre 12 y 30; su densidad específica es relativamente baja, $< 2 \text{ g cm}^{-3}$. Contribuye hasta 30% del total de la MOS, y es un importante pool de disponibilidad de C durante su descomposición” (Stevenson y Cole, 1999; citado por ZAGAL *et al.*, 2002). Resultados similares obtuvieron CABALLERO y HERNÁNDEZ (2013) reportaron concentraciones de carbono en el orden fracción liviana libre (FLL) > fracción liviana oclusa (FLO) > fracción pesada (FP).

4.3.2. CADMIO EN LA FRACCIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA

En el Cuadro 25 se muestra los resultados del análisis de cadmio total en la fracción química de la materia orgánica, en orden descendente los valores promedio son: humina (HUM) 0.398 ppm, ácidos húmicos (AH) 0.342 ppm y ácidos fúlvicos (AF) 0.251 ppm. El orden de fijación del cadmio en la fracción química de la materia orgánica fue H>AH>AF. Estos resultados difieren a los obtenidos por OTTOS (2018) quien determinó los siguientes contenidos de Cd total: ácidos fúlvicos (AF) 0.70 ppm, humina (HUM) 0.34 ppm y ácidos húmicos (AH) 0.05 ppm.

En el presente estudio, la humina presentó el mayor contenido de cadmio (0.398 ppm), este resultado posiblemente esté relacionado a la variabilidad de composición y características que tiene la humina, presencia de carbonatos, óxidos, además el proceso de extracción secuencial de ataque con ácido y base pudieron haber afectado (BENITES *et al.*, 2003). WANG y XING (2005) encontraron que las diferentes huminas obtenidas por distintos métodos de extracción difieren considerablemente en su composición y estructura química, en la adsorción de compuestos orgánicos. sabiendo que la humina es la fracción más recalcitrante más estable que incluye a las arcillas, sin embargo, podrían tener presencia de ácidos húmicos y fúlvicos, al respecto

DUCHAUFOR (1984) concluye que la humina puede estar constituida por ácidos húmicos y fúlvicos unidos fuertemente a la fracción mineral del suelo. Además, la humina puede integrar otros componentes que contribuyen a la retención del cadmio relacionado a los minerales del suelo. Según HAYES y CLAPP (2001) las huminas están integradas de compuestos químicos, además tienen compuestos no húmicos como hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares, asociados a los minerales del suelo. Los procedimientos de extracción secuencial proporcionan evidencia consistente de que las fracciones más insolubles de material húmico juegan un papel importante en la unión de metales (MACIAS, 2013).

Los ácidos húmicos alcanzaron retener 0.342 ppm, ocupando la segunda posición con respecto a las demás fracciones, los AH constituyen la mayor fracción extractable de las sustancias húmicas y tienen mayor peso molecular que los ácidos fúlvicos. Suelen ser de carácter anfótero (PÉREZ, 2009). Según PETTIT (2012) los elementos acomplejados en los AH son de importancia. ÖZKARAOVA y BEKBÖLET (2010) indican que los grupos funcionales, carboxílicos, hidroxílicos y fenólicos de los AH adsorben metales, con una estabilidad dependiente de la interacción con otros componentes de suelo. Según, Eteelink (1985) citado por OLIVER (2009) los ácidos húmicos contienen mayor cantidad de carbono, hidrogeno y nitrógeno que los ácidos fúlvicos. Hernández (2011) citado por MACIAS (2013) menciona que los ácidos húmicos tienen alta estabilidad relativa y distinta reactividad y una de sus formas muy interesantes es la presencia de vacíos de variadas dimensiones, los cuales pueden atrapar o unir otros componentes orgánicos como carbohidratos, proteínas y lípidos o también arcillas minerales y oxihidróxidos. La cantidad de cadmio en esta fracción podría haber sido afectada dado que la muestra de suelo fue atacada en el laboratorio con ácido a pH 2 para su separación, precipitando probablemente el cadmio a la humina (OTTOS, 2018). Los AH tienden a inmovilizar y a acumular metales en la fase sólida del suelo por lo que se considera que controlan la absorción radicular de metales por las plantas (EVANS, 1989).

La menor fracción de cadmio se obtuvo en los AF (0.251 ppm). RON (2004) indica que los AF tienen menor agregación y estabilidad; lo cual podría estar relacionado al menor contenido de cadmio determinado en el presente estudio. VENEGAS (2008) al analizar muestras de suelo de pradera natural (Chile) determinó 1.48% de AF, 1.56% de AH y 70.09% de humina; las cantidades de las fracciones húmicas obtenidas al momento del fraccionamiento de la materia orgánica podrían influenciar en el contenido de cadmio total; otros factores que también pueden influir serían el método de análisis, el tipo de suelo y la calidad de materia orgánica. En términos generales, “las sustancias húmicas representan una mezcla heterogénea de polímeros coloidales con alta polifuncionalidad e hidrofiliidad” (Sposito, 1989; citado por REYES y BARRETO, 2011).

Cuadro 25. Cadmio total promedio en la fracción química de la materia orgánica.

Clave	Cadmio total (ppm) (USEPA-3050B)		
	Fracción química		
	Ácidos húmicos (AH)	Ácidos fúlvicos (AF)	Humina (HUM)
T ₀	0.325	0.288	0.439
T ₁	0.350	0.256	0.409
T ₂	0.335	0.256	0.387
T ₃	0.335	0.256	0.386
T ₄	0.355	0.208	0.384
T ₅	0.345	0.240	0.344
T ₆	0.348	0.257	0.438
(*)	0.342	0.251	0.398

(*) = promedio

Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

La mayor concentración de cadmio total expresado en porcentaje se encontró en la humina (HUM) con 40.16%, seguido de los ácidos húmicos (AH) con 34.51% y en menor cantidad en los ácidos fúlvicos (AF) con 25.33% (Figura 23). Estos resultados son diferentes a los obtenidos por OTTOS (2018), quien al analizar 20 muestras de suelo determinó en promedio en los ácidos fúlvicos (AF) 64.67%, humina (HUM) 30.84% y en ácidos húmicos (AH) 4.49% de cadmio total. VENEGAS (2008) afirma que el contenido de las sustancias húmicas en la materia orgánica es variable y depende del tipo y manejo del suelo, al método utilizado en proceso de extracción, separación y purificación de la muestra de suelo; el mismo autor al cuantificar el porcentaje de C de la orgánica encontró 49.80% (AH), 37.20% (AF) y 4.44% en la HUM.

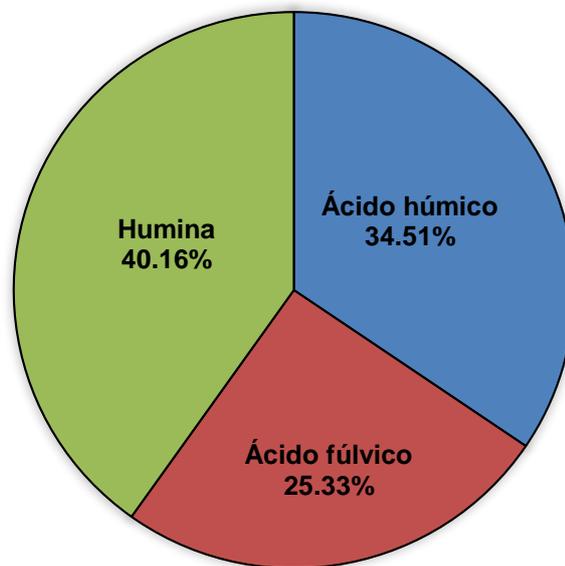


Figura 23. Cadmio total en la fracción química de la materia orgánica.

En el Cuadro 26, se indica los cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para el contenido de cadmio total en la fracción química de la materia, según la prueba de F ($\alpha = 0.05$); se observa que no existe diferencias estadísticas significativas entre tratamientos con respecto a las tres

fracciones químicas, es decir todos los tratamientos en estudio tuvieron un igual comportamiento estadístico, no ameritando realizar la prueba de Duncan.

En cadmio total de la materia orgánica resultante del fraccionamiento físico con respecto al fraccionamiento químico fue 20% menos, es decir se obtuvo más cadmio total en las fracciones químicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina) versus las fracciones físicas (fracción liviana libre, fracción liviana oclusa, fracción pesada) de la materia orgánica (Figura 24).

El mayor contenido de cadmio logrado en la fracción química de la materia orgánica, probablemente esté relacionado al efecto de los ácidos utilizados en la metodología de los análisis, los cuales hayan solubilizado el cadmio de otros compuestos minerales del suelo (sulfatos, carbonatos, óxidos, etc.).

Cuadro 26. Cuadrados medios del análisis de variancia ($\alpha = 0.05$) para el contenido de cadmio total en la fracción química de la materia orgánica.

Fuente de variación	G.L.	Fracción química de la materia orgánica					
		Ácidos húmicos		Ácidos fúlvicos		Humina	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
Tratamiento	6	0.0090	NS	0.002	NS	0.005	NS
Bloque	3	0.0345	S	0.010	NS	0.020	S
Error	18	0.0006		0.010		0.004	
Total	27						
C.V (%)		5.27		29.32		15.67	

Leyenda:

S = Significativo
 NS = No significativo
 AS = Altamente significativo

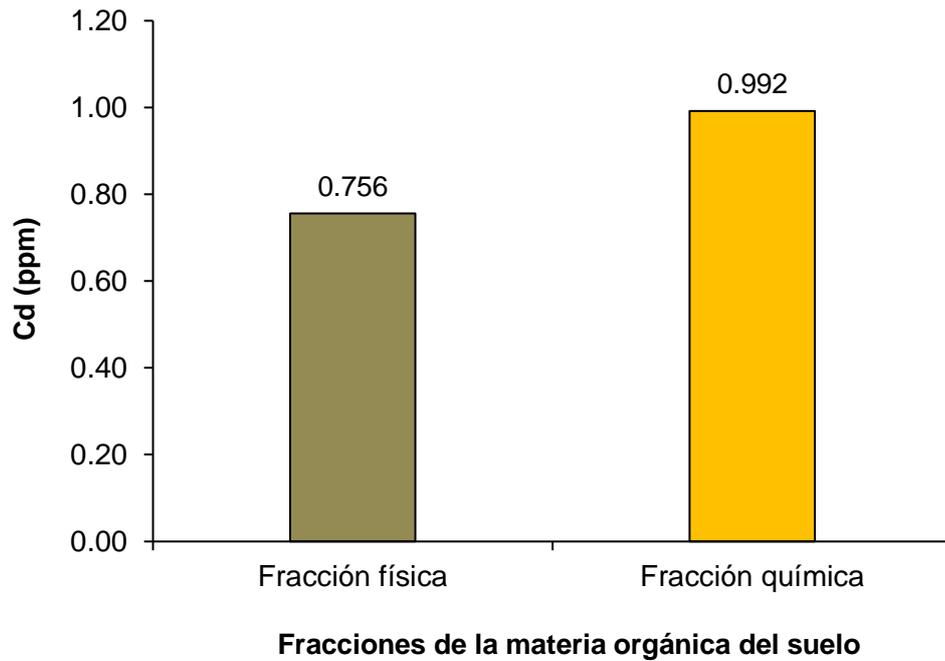


Figura 24. Cadmio en las fracciones de la materia orgánica del suelo.

4.4. CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE EL CADMIO TOTAL DEL GRANO, FRACCIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA CON RESPECTO A LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Los valores de correlación de Pearson entre las variables antes mencionadas se muestran en el Cuadro 27. El cadmio de la fracción pesada de la materia orgánica evidenció una correlación positiva significativa ($p < 0.05$) con el cadmio total del suelo (0.39). Según Zagal *et al.* (2002) la fracción pesada es aquella que se encuentra incorporada en los complejos órgano-minerales (arcillas, óxidos, carbonatos, etc.) del suelo y que está fuertemente transformada. “En general, la capacidad de las arcillas para retener metales pesados está directamente relacionada con su capacidad de intercambio catiónico” (LENOIR y TORNARI, 2004). “La arcilla tiene un papel fundamental a la hora de caracterizar la contaminación de metales pesados en suelos ya que influye sobre su movilidad. Tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos, carecen de esta capacidad de fijación por lo que los metales

pesados pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos” (PÉREZ, 2006). Hooda y Alloway (1998) citado por PÉREZ (2006) “han encontrado correlación positiva entre el contenido de arcilla y los parámetros de retención de cadmio y plomo al estudiar las isotermas de adsorción, y correlación negativa respecto al contenido de arenas de distintos suelos”. El cadmio de los ácidos húmicos (AH) de la materia orgánica demostraron una correlación positiva y significativa ($p < 0.05$) con el potasio (K) del suelo y el cadmio de la fracción liviana libre (FLL) de la materia orgánica (0.39, 0.38). “Los AH tienen un papel fundamental en la retención de iones metálicos formando enlaces fuertes en sus grupos carboxílicos y fenólicos, con mayor capacidad y fuerza de retención, mientras los ácidos fúlvicos movilizan metales por fenómenos de complejación y solubilización” (BRAVO *et al.*, 2014). La fracción liviana libre de la materia orgánica posee alto porcentaje de carbono, mayor biomasa microbiana, respecto a las demás fracciones, favoreciendo la concentración de las sustancias húmicas. El cadmio de los ácidos fúlvicos (AF) muestran una correlación negativa y significativa ($p < 0.05$) con el cadmio de la fracción liviana libre (FLL) de la materia orgánica (-0.44). Los ácidos fúlvicos son característicos de suelos ácidos pobres, con poca actividad microbiológica, en cambio los ácidos húmicos son propios de suelos débilmente ácidos-neutros ricos en nutrientes con alta actividad microbiológica (PÉREZ, 2009). “El cadmio de la humina (HUM) reveló una correlación negativa y significativa ($p < 0.05$) con el magnesio (Mg) y la CIC del suelo (-0.38, -0.37) respectivamente. La adición de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) a los suelos en distintas cantidades y formas químicas, afecta la absorción de cadmio por las plantas debido a que se producen cambios en el pH y en la capacidad de intercambio catiónico de los suelos” (Li *et al.*, 2011; citado por SÁNCHEZ, 2013). La CIC está directamente relacionada a la capacidad de los suelos de absorber metales pesados (AZEVEDO *et al.*, 2003). El cadmio de la humina también evidenció una correlación positiva con los ácidos fúlvicos.

Finalmente, el cadmio del grano de cacao tuvo una correlación negativa y significativa ($p < 0.05$) con el cadmio de la fracción liviana libre (FLL) (-0.37).

La FLL está integrada de restos vegetales en estado inicial de descomposición, es la fracción más reactiva y estaría formando compuestos activos en distintos grupos funcionales de carbono aromático, alquilo, carbonilo y ácidos carboxílicos. La presencia de microorganismos en esta materia orgánica favorecería la adsorción y absorción del cadmio presente, los grupos funcionales de los microorganismos tienen la capacidad de retener e intercambiar los iones como el cadmio, haciéndolo menos disponibles para las plantas (Skjemstad *et al.*, 1996; citado por OTTOS, 2018). La FLL también presenta los mayores contenidos de carbono orgánico total, el cual sirve de alimento para la biomasa microbiana, existe una correlación positiva entre los microorganismos y el carbono del suelo (ARMADO *et al.*, 2009). “La composición de la materia orgánica y la fase mineral del suelo, son las que influyen significativamente en la especiación del Cd; por ejemplo, suelos con altos contenidos de materia orgánica u óxidos de hierro adsorben más Cd que los que tienen grandes cantidades de arcillas tipo 2:1, aunque tengan alta CIC” (Lombi *et al.*, 2003; citados por REYES y BARRETO, 2011). En suelos ácidos, la materia orgánica puede controlar fuertemente la solubilidad del cadmio, cuando esta se incrementa, las formas intercambiables de cadmio también lo hacen (Pendias, 1992; citado por BELTRÁN, 2001).

“En términos generales, la materia orgánica, tanto soluble como particulada, altera la distribución de los metales pesados; se produce por regla general una disminución de los niveles disueltos y un aumento de la concentración de metales en la forma coloidal y en suspensión, así como en los sedimentos. Los exudados orgánicos de ciertos organismos, los quelantes naturales como succinato, citrato y aspartato, los aminoácidos con grupos sulfhidrilo (-SH) presente en el medio, los quelantes orgánicos de síntesis (EDTA, NTA) y los ácidos húmicos y fúlvicos son algunas de las sustancias orgánicas capaces de retener metales, aunque sea en forma temporal” (LEE *et al.*, 1997; citado por ROSAS, 2001).

Cuadro 27. Análisis de correlación de Pearson entre el cadmio en la fracción liviana libre, liviana oclusa, pesada, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina con las características químicas del suelo.

Variable	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	CIC	Cadmio disponible	Cadmio total	Fracción liviana libre	Fracción liviana oclusa	Fracción pesada	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos	Humina
Fracción liviana libre	0.13	-0.19	0.09	0.17	-0.02	0.11	0.14	0.19	-0.01						
Fracción liviana oclusa	0.04	0.14	-0.07	-0.07	0.01	-0.12	-0.10	0.08	-0.08	-0.19					
Fracción pesada	0.24	0.10	0.09	0.25	0.12	0.15	0.23	0.01	0.39*	0.01	-0.16				
Ácidos húmicos	0.17	-0.13	0.10	0.39*	0.08	0.11	0.22	-0.04	-0.09	0.38*	0.13	0.04			
Ácidos fúlvicos	-0.09	-0.13	-0.23	-0.08	-0.26	-0.13	-0.21	0.04	0.25	-0.44*	0.18	-0.04	-0.31		
Humina	-0.15	0.03	0.09	-0.17	-0.13	-0.38*	-0.37*	0.12	-0.01	-0.33	0.30	0.01	-0.37	0.39*	
Cadmio grano	0.12	0.19	-0.19	0.19	0.17	-0.13	-0.08	-0.09	-0.17	-0.37*	0.19	-0.04	-0.09	0.04	0.09

(*) La correlación es significativa en el nivel 0.05

(**) La correlación es significativa en el nivel 0.01

Con la finalidad de conocer el coeficiente de determinación de las variables que mostraron correlación significativa en el análisis de Pearson, se realizó el análisis de regresión.

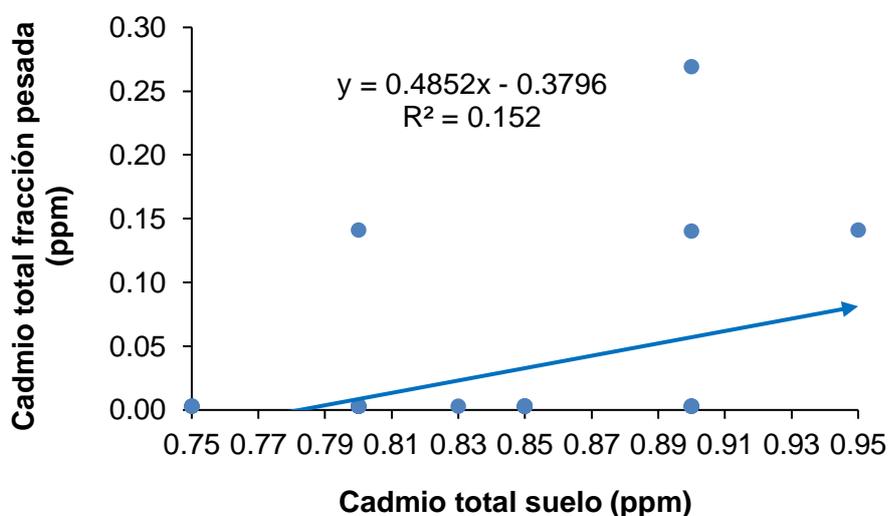


Figura 25. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la fracción pesada y el cadmio total del suelo.

El 15.20% del cadmio total de la fracción pesada está influenciado por el cadmio total del suelo (Figura 25). El potasio del suelo tiene una dependencia del 15.43% del cadmio de los ácidos húmicos (Figura 26).

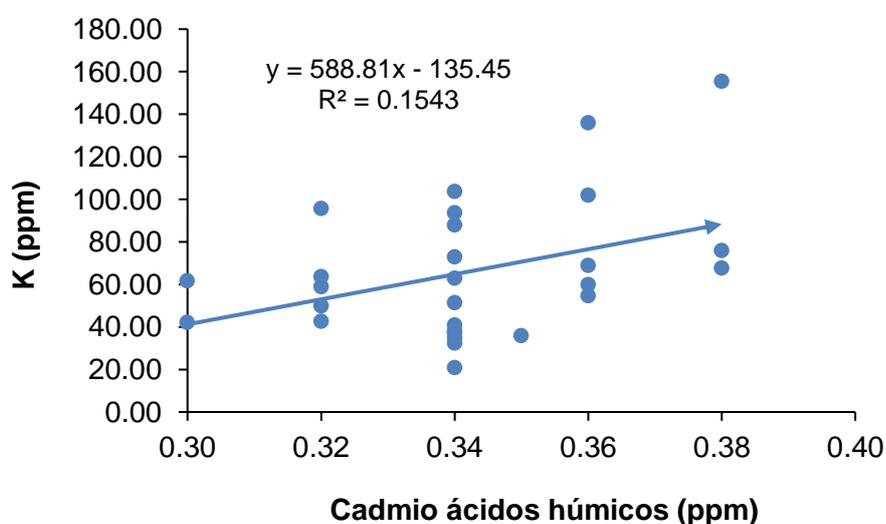


Figura 26. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el potasio del suelo y el cadmio de los ácidos húmicos.

En la figura 27 se muestra la relación entre el cadmio de los ácidos húmicos y el cadmio de la fracción liviana libre de la materia orgánica, cuya dependencia es del 14.38%.

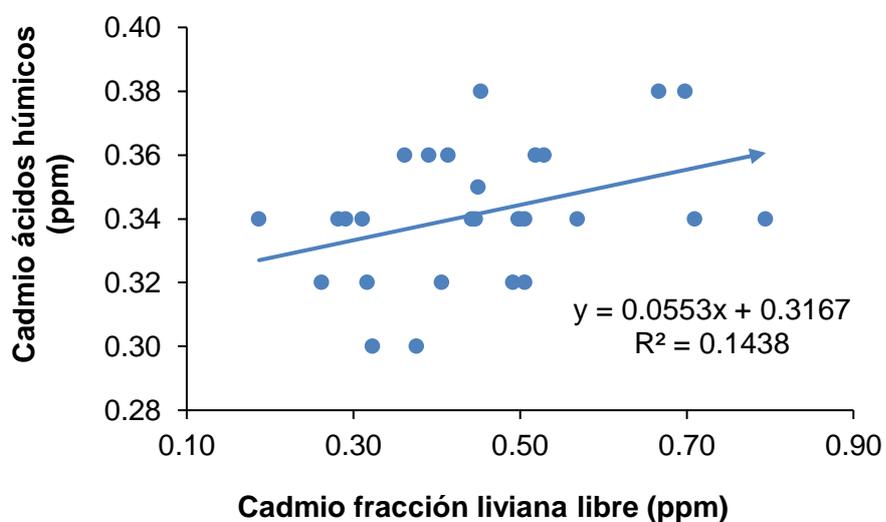


Figura 27. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de los ácidos húmicos y el cadmio en la fracción liviana libre.

El 19.62% del cadmio de los ácidos húmicos está influenciado por el cadmio de la fracción liviana libre (Figura 28).

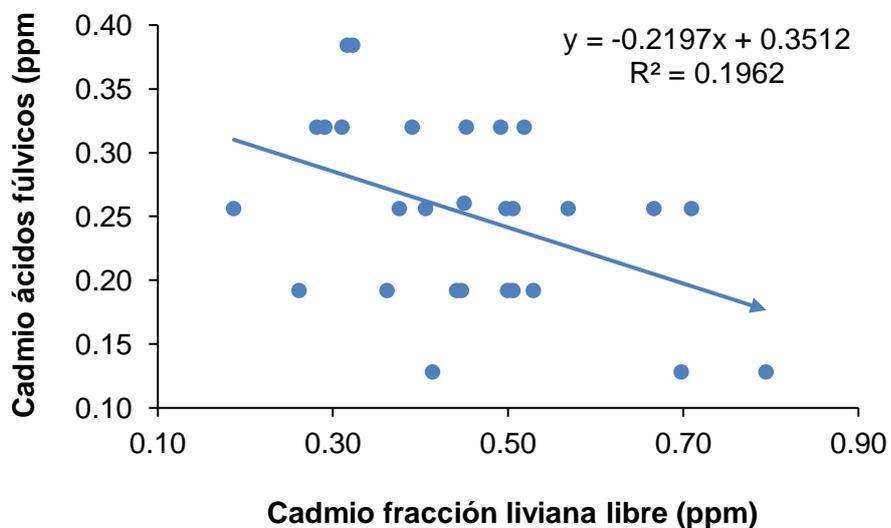


Figura 28. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de los ácidos fúlvicos y el cadmio de la fracción liviana libre.

La disminución del cadmio en la humina tiene una influencia del 14.42% por el magnesio del suelo (Figura 29).

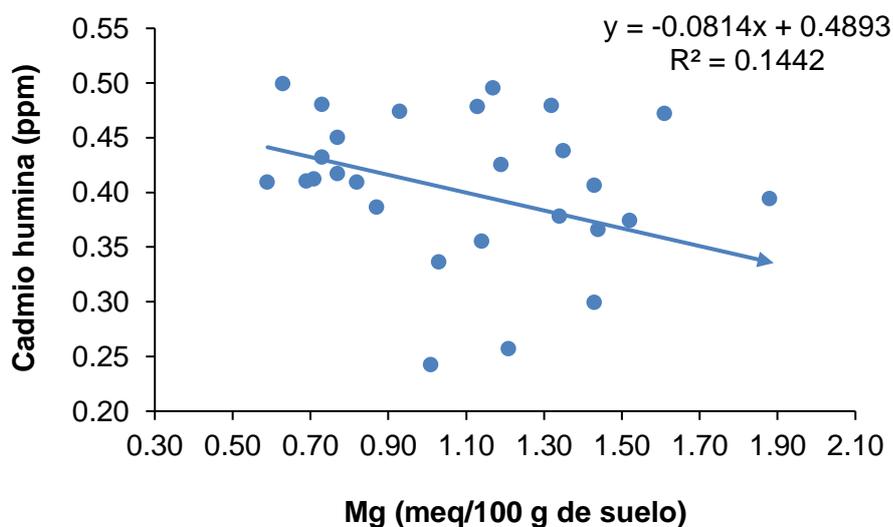


Figura 29. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la humina y el magnesio.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo tiene una influencia del 14.20% en la disminución del cadmio de la humina (Figura 30).

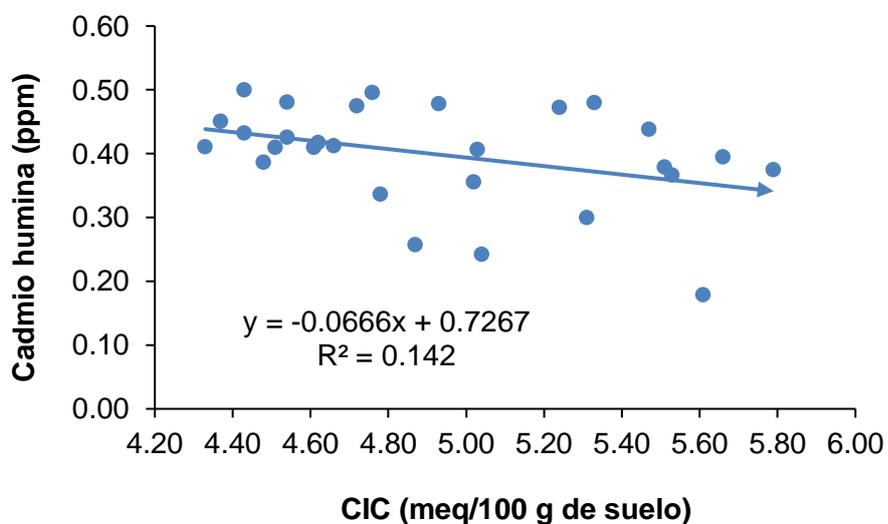


Figura 30. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la humina y la CIC del suelo.

Las figuras 31 y 32 tienen una dependencia entre variables de 15.98% y 15.61% respectivamente, la variable predictora muestra una correlación positiva y negativa respecto a variable respuesta.

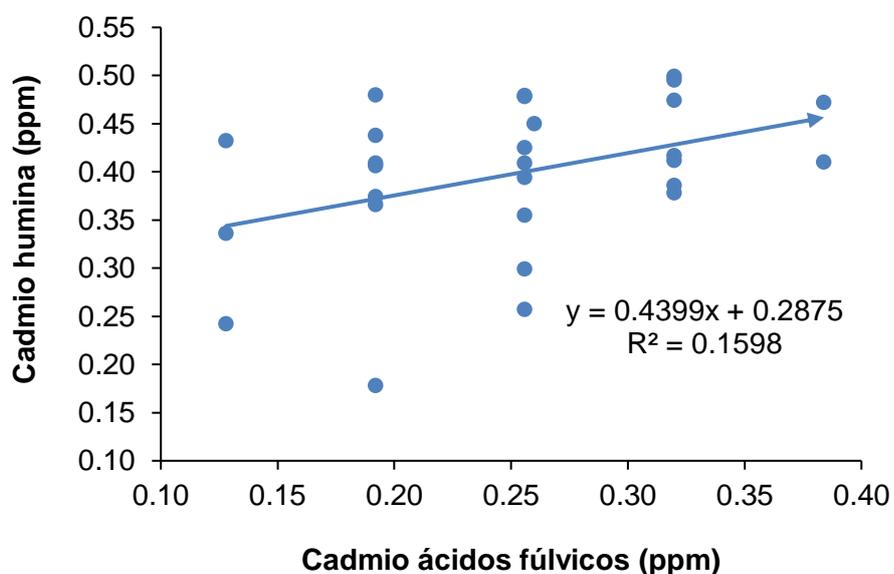


Figura 31. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio de la humina y los ácidos fúlvicos.

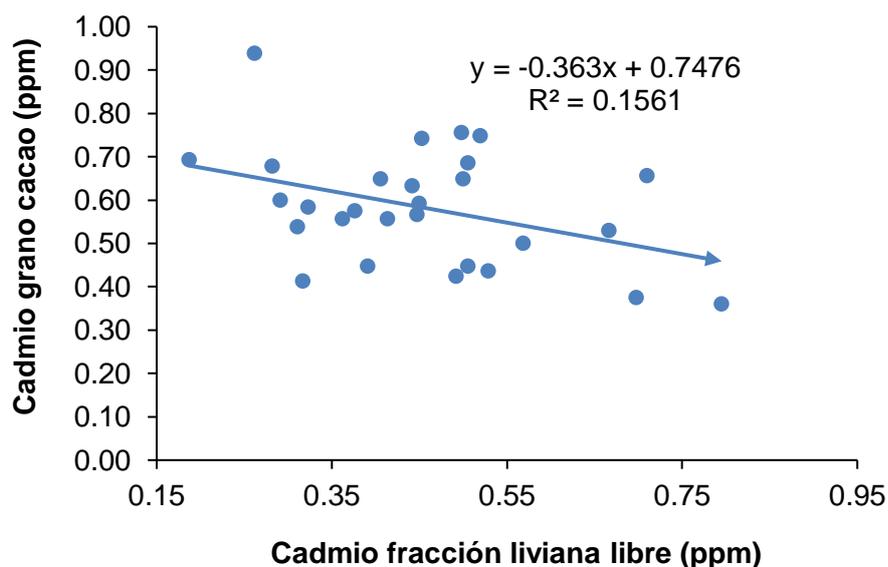


Figura 32. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el cadmio del grano de cacao y el cadmio de la fracción liviana libre.

V. CONCLUSIONES

1. La característica física del suelo RPS no varió, registrándose un valor promedio de 2.20 kg/cm²; en cambio las características químicas del suelo se incrementaron, mostrando diferencias estadísticas significativas, cuyos valores promedios fueron: pH (4.59), materia orgánica (2.98%), fósforo (9.98 ppm), potasio (65.80 ppm), calcio (2.10 meq/100 g), magnesio (1.12 meq/100 g), capacidad de intercambio catiónico (4.93 meq/100 g), acidez cambiante (1.36 meq/100 g) esta última disminuyó con respecto al testigo.
2. El Cd total cuantificado en el suelo fue de 0.84 ppm y el Cd disponible representó el 30.95% del Cd total. El Cd en las almendras por efecto de la aplicación de las enmiendas disminuyó hasta 0.25 ppm, muy por debajo del límite máximo permisible de la Unión Europea (0.50 ppm de cadmio).
3. En la fracción física de la materia orgánica la mayor concentración de Cd total se encontró en la fracción liviana libre (FLL) con 60.05%, seguido de la fracción liviana oclusa (FLO) con 36.38% y en menor cantidad en la fracción pesada (FP) con 3.57%. Con respecto a la fracción química la mayor concentración de Cd total se encontró en la humina (HUM) con 40.16%, seguido de los ácidos húmicos (AH) con 34.51% y en menor cantidad en los ácidos fúlvicos (AF) con 25.33%.
4. Se determinó correlaciones positivas significativas entre el Cd total y el Cd de la fracción pesada; Cd de la fracción liviana libre con el potasio y el Cd de los ácidos húmicos; Cd de los ácidos fúlvicos con el Cd de la humina; de igual modo se determinó correlaciones negativas significativas entre la CIC, Mg y el Cd de la humina; Cd de la fracción liviana libre y el Cd de los ácidos fúlvicos y finalmente entre el Cd de la fracción liviana libre y el cadmio del grano.

VI. RECOMENDACIONES

1. Continuar las investigaciones para disminuir los contenidos de cadmio de los granos de cacao, evaluando nuevas fuentes y niveles de productos orgánicos y minerales.
2. Para evitar el uso de altas dosis de materia orgánica, sería conveniente considerar solamente el área efectiva de aplicación al suelo.
3. Evaluar las propiedades biológicas del suelo, dado que estas influyen en la concentración y disponibilidad del cadmio en el suelo.
4. Dilucidar si la captura del cadmio en el suelo es por efecto de los grupos funcionales de la materia orgánica o debido a la carga microbiológica.
5. Cuantificar el cadmio en el grano de cacao en épocas secas (julio, agosto) y lluviosas (noviembre, diciembre).

VII. RESUMEN

El presente trabajo de tesis se llevó a cabo en una finca de cacao CCN-51 de 14 años de edad, ubicada en el caserío de Marona Baja, distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco; teniendo como objetivos evaluar el efecto del compost, dolomita y magnocal en las propiedades fisicoquímicas del suelo, contenido de cadmio de los granos de cacao y relacionar el cadmio del grano, fracción física y química de la materia orgánica con respecto a las propiedades químicas del suelo. Se utilizó el diseño de bloques completamente al azar (DBCA), para la comparación de medias, se utilizó la prueba de Duncan con un nivel de significación ($\alpha = 0.05$). Los resultados fueron: (1) la característica física del suelo, resistencia a la penetración, no evidenció diferencias estadísticas significativas; en cambio las características químicas del suelo se incrementaron, mostrando diferencias estadísticas significativas, cuyos valores promedios fueron: pH (4.59), materia orgánica (2.98%), fósforo (9.98 ppm), potasio (65.80 ppm), calcio (2.10 meq/100 g), magnesio (1.12 meq/100 g), capacidad de intercambio catiónico (4.93 meq/100 g), acidez cambiante (1.36 meq/100 g) esta última disminuyó con respecto al testigo; (2) el cadmio total cuantificado en el suelo fue de 0.84 ppm y el cadmio disponible representó el 30.95% del cadmio total. El cadmio en las almendras por efecto de la aplicación de las enmiendas disminuyó hasta 0.25 ppm; (3) los mayores contenidos de cadmio total en la fracción física de la materia orgánica se registró en la FLL (0.45 ppm), con respecto a la fracción química en la HUM (0.39 ppm); (4) se determinó correlaciones positivas significativas entre el Cd total y el Cd de la fracción pesada; Cd de la fracción liviana libre con el potasio y el Cd de los ácidos húmicos; Cd de los ácidos fúlvicos con el Cd de la humina; de igual modo se determinó correlaciones negativas significativas entre la CIC, Mg y el Cd de la humina; Cd de la fracción liviana libre y el Cd de los ácidos fúlvicos y finalmente entre el Cd de la fracción liviana libre y el cadmio del grano.

ABSTRACT

The present thesis work took place on a farm of fourteen year old CCN-51 cacao located on the Marona Baja homestead, Luyando district, Leoncio Prado province, Huánuco region, Peru; with the objectives of evaluating the effects of compost, dolomite and Magnocal on the physicochemical properties of the soil, cadmium content in the cacao bean and to relate the cadmium from the bean, physical and chemical fraction of the organic matter with respect to the chemical properties of the soil. The completely randomized block design (CRBD; DBCA in Spanish) was used, for the comparison of averages the Duncan test at a ($\alpha = 0.05$) significance level was used. The results were: (1) the physical characteristics of the soil, resistant to penetration, no evidence of significant statistical differences; rather, the chemical characteristics of the soil increased, showing significant statistical differences, the average values of which were: pH (4.59), organic matter (2.98%), phosphorous (9.98 ppm), potassium (65.80 ppm), calcium (2.10 meq/100 g), magnesium (1.12 meq/100 g), cation exchange capacity (4.93 meq/100 g), exchangeable acidity (1.36 meq/100 g), the last of which diminished with respect to the control; (2) the total cadmium quantified in the soil was 0.84 ppm and the available cadmium represented 30.95% of the total cadmium. The cadmium in the beans, from the effect of the application of the correctors, diminished by up to 0.25 ppm; (3) the greatest contents of total cadmium in the physical fraction of the organic matter were registered in the FLL (0.45 ppm) (acronym in Spanish), with respect to the chemical fraction, in the HUM (0.39 ppm) (acronym in Spanish); (4) significant positive correlations were determined between the total Cd and the Cd of the weighted fraction; Cd from the free light fraction with potassium and the Cd from the humic acids; Cd from the fulvic acid with the Cd from the humin; in the same manner, the significant negative correlations between the CEC, Mg and Cd from the humin were determined; Cd from the free light fraction and the Cd from the fulvic acids and finally between the Cd from the free light fraction and the cadmium from the bean.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. ADAMS, M. 1995. Fundamentos de química de suelos. Universidad Central de Venezuela. ISBN 980-00-0669-9. [En línea]: Google books, (<https://books.google.com.pe/books?isbn=9800006699>, documentos, 12 ago. 2017).
2. AGAMA, J. 2005. Selección de progenies y plantas élites de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante la evaluación de sus características agronómicas y de Resistencia a enfermedades. Tesis Ing. Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador. p. 6-9.
3. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS – USEPA. 1996. Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. Estados Unidos. 12 p.
4. AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 2012. Public health statement for cadmium. Georgia, Estados Unidos. 10 p.
5. AGRODATAPERU. 2016. [En línea]: Cacao grano Perú exportación 2016, (<https://www.agrodataperu.com/2017/01/cacao-grano-peru-exportacion-2016-diciembre.html>, documentos, 03 may. 2019).
6. AOAC. 2000. Official method 999.11. Determination of lead, cadmium, copper, iron and zinc in foods. Maryland, Estados Unidos. 3 p.
7. ARAO, T., ISHIKAWA, S., MURAKAMI, M., ABE, K., MAEJIMA, Y., MAKINO, T. 2010. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan. *Paddy and Water Environment*, 8, 247-257.
8. ARAVIND, P., PRASSAD, M. 2005. Cadmium-Zinc interactions in a hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. 20 p.
9. ARMADO, A., CONTRERAS, F., GARCÍA, P. 2009. Fraccionamiento químico de carbono orgánico y su relación con la actividad microbiológica, biomasa microbiana y cantidad de ADN en suelos

- cacaoteros venezolanos. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. 10 p.
10. AZEVEDO, M., FERRACCIÚ, L., GUIMARÃES, L. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, vol. 60, no. 4, pp. 793–806. ISSN 0103-9016. DOI 10.1590/S0103-90162003000400029.
 11. BAIRD, C. 2001. *Química ambiental*. Editorial Reverté S.A. New York, Estados Unidos. 625 p.
 12. BALDOCK, J., OADES, J., WATERS, A., PENG, X., VASSALLO, A., WILSON, M. 1992. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ¹³C NMR spectrometry. *Biogeochemistry*, 16, 1-42.
 13. BARRAGÁN, O. 2008. Estudio de diferentes metodologías para determinar la biodisponibilidad de cadmio y arsénico en suelos y su relación con la concentración en plantas. Bogotá, Colombia. 5 p.
 14. BARRUETA, S. 2013. Guía metodológica para el muestreo y detección de cadmio en suelos, agua, fertilizantes, almendras de cacao y productos derivados. Presidencia del Consejo de Ministros. Lima, Perú. 76 p.
 15. BAUTISTA, B. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México. 67 p.
 16. BELTRÁN, M. 2001. Fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles. Proyecto de investigación para optar el grado de Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana. Distrito Federal de México, México. 176 p.
 17. BENAVIDES, M.P., GALLEGO, S.M., TOMARO, M. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Braz J Plant Physiol* 17: 21-34.
 18. BENITES, V., MADARI, B., MACHADO, P. 2003. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado e de baixo custo. Brasília, Embrapa, Brasil. (Comunicado técnico 16). 7 p.

19. BRAVO, I., ARBOLEDA, C., MARTÍN, F. 2014. Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia. Universidad del Cauca, Colombia. 14 P.
20. CABALLERO, R., HERNÁNDEZ, R. 2013. Efecto del uso de coberturas perennes y fertilización fosforada sobre la materia orgánica de un suelo de sabana manejado en forma conservacionista. 7 p.
21. CAHUASQUI, S. 2011. Determinación de metales pesados (plomo, cadmio y níquel) en el cilantro (*Coriandrum sativum L*) en Aloag, cantón Mejía, provincia de Pichincha por espectrofotometría de absorción atómica de llama. Tesis Ing. Química analítica. Quito Ecuador. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador. 91 p.
22. CALDERON, E., CONCHA, R. 2002. Evaluación de las concentraciones de metales pesados para determinar la calidad de frutas de consumo masivo en la ciudad de Piura. Universidad Nacional de Piura. Piura, Perú. 10 p.
23. CALLIRGOS, C. 2014. Evaluación de la capacidad fitorremediadora de la especie *Chrysopogon zizanioides* mediante la incorporación de enmiendas en relaves mineros. Tesis Ing. Ambiental. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina. 192 p.
24. CÁRDENAS, A. 2012. Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo, Tingo María, Perú. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Huánuco. Perú. 96 p.
25. CARRASCO, M. 1972. Distribution of electric charge in Chilean soils derived from volcanic ash. Thesis M.Sc. New York, EE.UU. University de Cornell. 142 p.
26. CARRASCO, M.A. 2005. Metales pesados en el suelo. Santiago de Chile. Chile. 33 p. [En línea]: SAG, (http://www.biblioteca-digital.sag.gob.cl/...suelos...suelos/5_metales_pesados_suelo.pdf, PDF, 23 set. 2017).
27. CERDAS, R. 2012. Programa de fertilización de forrajes. Desarrollo de un módulo práctico para técnicos y estudiantes de ganadería de

- Guanacaste, Costa Rica. Revista InterSedes. Vol. XII. (24-2011) 109-128. ISSN: 2215-2458. Guanacaste, Costa Rica. 22 p.
28. CHAN, D.Y., HALE, B.A. 2004. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany* 55:2571-2579.
 29. CHRISTENSEN, B. T. 2000. Organic matter in soil: structure, function and turnover. Tjele: DIAS. 95 p. (DIAS Report. Plant Production, 30).
 30. CLEMENS, S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88:1707-1719.
 31. CLEMENS, S., ANTOSIEWICZ, D.M., WARD, J.M., SCHACHTMAN, D.P., SCHROEDER, J.I. 1998. The plant CDNA LCT1 mediates the uptake of calcium and cadmium in yeast. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 95:12043-12048.
 32. CODEX ALIMENTARIUS. 2014. Anteproyecto de niveles máximos para el cadmio en el chocolate y productos derivados de cacao (elaborado por el grupo de trabajo electrónico liderado por Ecuador y copresidido por Ghana y Brasil). Roma, Italia. 20 p.
 33. CONCEIÇÃO, P.C., BOENI, M., BAYER, C., DIECKOW, J., SALTON, J.C., 2015. Eficiência de Soluções Densas no Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Vol. 39:490-497. DOI: 10.1590/0 1000683rbc20140447.
 34. CONTRERAS, F., HERRERA, T., IZQUIERDO, A. 2005. Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao L.*) en suelos de Barlovento, estado Miranda. Venezuela. *Venesuelos* 13:52-63. 12 p.
 35. CONTRERAS, K. 2006. Evaluación del estado estructural del suelo utilizando parámetros sencillos: el coeficiente de descanso. Tesis Lic. Agronomía. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 66 p.
 36. COORDINACIÓN GENERAL DE MINERÍA. 2013. Perfil de mercado de la dolomita. Estados Unidos Mexicanos. 51 p.
 37. CORDOBA, G. 2012. Importancia del análisis de los metales pesados. [En línea]: Introducción geoquímica exógena,

(<https://es.slideshare.net/Graciela05/02-introduccion-geoquimica-exogena>, documentos, 20 abr. 2018).

38. DEMUNER, G., CADENA, M., CAMPOS, S. 2013. Resistencia a la penetración en un suelo franco arcilloso a dos años de manejo con tres sistemas de labranza. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 9 p.
39. DÍAZ, A. 2014. Contenidos máximos en metales pesados en productos alimenticios. Revisión agosto 2014. Valencia, España. 24 p.
40. DIEZ, L. J. 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Tesis Dr. Biología. Galicia, España. Universidad de Santiago de Compostela. 336 p.
41. DOMÍNGUEZ - SOLÍS, J.R., LÓPEZ-MARTIN, M.C., AGER, F.J., YNSA, M.D., ROMERO, L.C., GOTOR, C. 2004. Increased cysteine availability is essential for cadmium tolerance and accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Biotechnology Journal* 2:469-476.
42. DUCHAUFOR, P. 1984. Edafología, edafogénesis y clasificación. Masson, S.A. Paris, Francia, 493 p.
43. ESPINOSA, J., MOLINA, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. 1 Ed. Quito, Ecuador. 46 p.
44. EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY - EFSA. 2009. Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain on a request from the European Commission on cadmium in food. *The EFSA Journal* 980. 139 p.
45. EVANS, L.J. 1989. Chemistry of metal retention by soils. *Environmental Science and Technology*, 23, 1046 –1056.
46. GALÁN, E. 2000. The role of clay minerals in removing and immobilising heavy metals from contaminated soils. In *Proceedings of the 1st Latin American Clay Conference*”, vol. 1, C. Gomes, ed. Funchal. p. 351-361.
47. GARCÍA, I., DORRONSORO, C. 2002. Contaminación por metales pesados. [En línea]: IDIAF, (<http://www.idiaf.gov.do/publicaciones/>

<Publications/cacao/HTML/files/assets/basic-html/page76.html>,

Documentos, 23 ago. 2017).

48. GARCÍA, I., DORRONSORO, C. 2005. Contaminación por metales pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. España. 267 p.
49. GOLCHIN, A. 1997. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregates dynamics. In: LAL, R. (Ed.). Soil processes and the carbon cycle. Boca Raton, FL: CRC, 1997. p. 245-266.
50. GOLDBOL, D.L., HUTTERMAN, A. 1985. Effect of zinc, cadmium and mercury on root elongation on *Picea abies* (Karst.) seedlings and the significance of these metals to forest die-back. Environ Pollut 38: 375-381.
51. GÓMEZ, R. 2018. Paquete tecnológico para disminuir el contenido de cadmio de los granos de cacao. Cooperativa Agroindustrial Cacao Alto Huallaga. Tingo María, Perú. 16 p.
52. GONZÁLEZ, A. 2010. Determinación y validación de cadmio total e intercambiable en algunos suelos cacaoteros del departamento de Santander. Tesis. Ing. Químico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 172 p.
53. GOUIA, H., GHORBAL, M.H., MEYER, C. 2000. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of nitrate assimilation pathway in bean. Plant Physiol Biochem 38: 629-638.
54. GREENLAND, D.J., HAYES, W.H.B. 1978. The chemistry of soil constituents. John Wiley y Sons, New York, Estados Unidos. 714 p.
55. GREGORICH, E., BEARE, M., MCKIM, U., SKJEMSTAD, J. 2006. Chemical and biological characteristics of physical uncomplexed organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 975-985.
56. GREGORICH, E.G., ELLERT, B.H. 1993. Light fraction and macro organic matter in mineral soils. In: Carter, M.R. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. CRC Press, Boca Raton, p. 397-407.
57. GUARDADO, L. 2012. Gallinaza y bocashi: ventajas de su aplicación. San Salvador, SV. Aves. 2 p.

58. GUERINOT, M.L. 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica Acta* 1465:190-198.
59. GUTENBERT, J. 2000. Investigación y desarrollo tecnológico de procesos de compostaje y aplicación del compost en los sectores agrícola y forestal. Sevilla, España. 4 p.
60. HAYES, M., CLAPP, E. 2001. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*. 2001. 166 (11): 723-737.
61. HUAMANÍ, H., HUAUYA, M., MANSILLA, L., FLORIDA, N., NEIRA, G. 2012. Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta agronómica*. 61 (4) 2012, p. 339-344.
62. HUAMANÍ, H., HUAUYA, M., TANTALEAN, E. 2016. Difusión de resultados preliminares del proyecto “Desarrollo de un plan de manejo de la fertilidad orgánica de los suelos para reducir la acumulación de cadmio en las almendras de cacao en el ámbito de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo Ltda.” En: Taller: Contenido de metales pesados en cacaotales de Tingo María. Tingo María. Perú. 28 p.
63. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS – INIAP. 2007. Manual del cultivo de cacao. 2a Ed. Corregida y aumentada. EET Pichilingue, Quevedo, Ecuador. Manual N° 25. 135 p.
64. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIAP). 2015. Ecuador. 2 p. [En línea]: Metales pesados en cacao, perspectivas y posible manejo, ([http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/049b3f076c63e02705257e0e005767b1/\\$FILE/AA%20-%207%20Julio-2015.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/049b3f076c63e02705257e0e005767b1/$FILE/AA%20-%207%20Julio-2015.pdf), PDF, 18 jun. 2018).
65. KABATA-PENDIAS, A. 2000. Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, USA. 413 p. [En línea]: Agriculture, ([https:// www.e-agriculture.biz/.../Soil/ Trace%20](https://www.e-agriculture.biz/.../Soil/Trace%20)

Elements%20in%20Soils%20and%20Plants.pdf, PDF, 03 set.
2017).

66. KRISHNAMURTI, G., NAIDU, R. 2003. Solid-solution equilibria of cadmium in soils. Elsevier. Geoderma 113 (2003) 17-30. Estados Unidos. 113 p.
67. LAMB, D. T., MING, H., MEGHARAJ, M. & NAIDU, R. 2009. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) partitioning and bioaccessibility in uncontaminated and long-term contaminated soils. Journal of Hazardous Materials, 171, 1150-1158.
68. LARA, V. 2017. Evaluación del contenido de cadmio en dos variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando distintos métodos de secado en la localidad de Luz de América. Tesis Ingeniero Agropecuario. Universidad de las Fuerzas Armadas. Santo Domingo. Ecuador. 61 p.
69. LARIOS, B. M. 2014. Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del río Turia. Navarra, España. Tesis Máster en gestión de suelos y agua. Universidad Pública de Navarra. 171 p.
70. LENOIR, C., TORNARI, G. 2004. Contaminación y tratamiento de suelo. Buenos Aires, Argentina. 66 p.
71. LI, F., NI, L., YUAN, J., DANIEL SHENG, G. 2010. Cultivation practices affect heavy metal migration between soil and Vicia faba (broad bean). Chemosphere.
72. LI, X., ZIADI, N., BÉLANGER, G., CAI, Z., Y XU, H. 2011. Cadmium accumulation in wheat grain as affected by mineral N fertilizer and soil characteristics. Canadian Journal of Soil Science, 91(4):521-531.
73. LIMA, J.M., ANDERSON, S.J. Y CURI, N. 2000. Phosphate-induced clay dispersion as related to aggregate size and composition in Hapludoxs. Soil Sci. Soc. Am. J., 64:892-897.
74. LOBOS, C. M. 2008. Efectividad de biosólidos para la fitoestabilización de un tranque de relaves minero, en la comuna de Nogales. Memoria Ing. Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 86 p.

75. MACIAS, M. 2013. Ultrafiltración: una técnica en la determinación de contaminantes ambientales. Tesis Ing. Químico. México Distrito Federal, México. Universidad Nacional Autónoma de México. 125 p.
76. MANSILLA, L. 2017. Cartilla de niveles críticos para la interpretación de análisis de suelos. Tingo María, Perú. 4 p.
77. MARRERO, J., DÍAZ, A., COTO, O. 2010. Mecanismos moleculares de resistencia a metales pesados en las bacterias y sus aplicaciones en la Biorremediación. Revista CENIC Ciencias Biológicas, 41 (1): 67-78.
78. MARTÍNEZ, C., MOTTO, H. 2000. Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. Environmental Pollution. 107: 153-158. [En línea]: NCBI, (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15093019>, documentos, 23 set. 2017).
79. MEJÍA, G. 2006. Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. Universidad CES. Medellín, Colombia. 23 p.
80. METRO, A., ATKINSON, R., LALIBERTE, B. 2019. Cadmio y cacao: una revisión de la investigación y recomendaciones para minimizar el cadmio en el cacao producido en América Latina. Bioversity International. Lima, Perú. 77 p.
81. MINISTERIO DEL AMBIENTE. 2013. Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo. Lima, Perú. 4 p.
82. MORA, J. 2006. La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Caldas, Colombia. 6 p.
83. MUÑOZ, M. 2016. Distribución y caracterización de los agregados edáficos de una repoblación de *Pinus halepensis* Mill., y una masa mixta de *Quercus faginea* Lam., y *Quercus ilex* subsp. *Rotundifolia* en Ampudia (Palancia). Universidad de Valladolid, España. 107 p.
84. OLIVER, M. 2009. Efectos fisiológicos de las sustancias húmicas sobre los mecanismos de toma de hierro en plántulas de tomate. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. Alicante, España. 285 p.

85. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). 2012. Guía de fertilizantes y nutrición. Servicio de fertilizantes y nutrición de las plantas. Dirección de fomento de tierras y agua. FAO. Roma, Italia. 198 p.
86. OTTOS, E. 2018. Fraccionamiento densimétrico y químico de la materia orgánica asociado al cadmio en suelo aluvial y residual cacaotero. Tesis Maestro en Ciencias en Agroecología Mención: Gestión de Suelos y Agua. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 95 p.
87. ÖZKARAOVA, G., BEKBÖLET, M. 2010. Zinc release by humic and fulvic acid as influenced by pH, complexation and DOC sorption. *Geoderma*, 159,131138. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.07.004.
88. PAPADOPOULOS, P., ROWELL, D. 1989. The reactions of copper and zinc with calcium carbonate surfaces. *Journal of Soil Science*. 40: 39-48.
89. PELLEGRINI, A. 2017. Fósforo en el suelo. Buenos Aires, Argentina. 13 p. [En línea]: Fósforo en el suelo – Aula Virtual – FCAYF (http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35407/mod_resource/content/1/TEMA%2013%20-%20F%C3%93SFORO.pdf, PDF, 15 jun. 2019).
90. PÉREZ, A. 2009. Bases edafológicas para la correcta utilización de un compost de lodos de aguas residuales urbanas, como enmienda orgánica. Tesis doctoral. Granada, España. Facultad de Farmacia. Universidad de Granada. 407 p.
91. PÉREZ, J. 2006. El potencial acumulador de cadmio y plomo de la *Nicotiana tabacum* L.; variedad “criollo 98” cultivada en suelos y sustrato artificial en San Juan y Martínez, Pinar del Río, Cuba. Tesis doctoral. Universidad de Pinar de Río. Pinar del Río, Cuba. 270 p.
92. PÉREZ, J. 2006. El potencial acumulador de cadmio y plomo de la *Nicotiana tabacum* L.; variedad “criollo 98” cultivada en suelos y sustrato artificial en San Juan y Martínez, Pinar del Río, Cuba.

Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba.
270 p.

93. PETTIT, R. 2012. Organic matter, humus, humate, humic acid, fulvic acid and humin: their importance in soil fertility and plant health. College Station, Texas, Unites States: Texas A&M University.
94. PIERZYNSKI, G.M., SIMS, J.T., VANCE, G.F. 2000. Soil Phosphorud and environmental quality. In *Soild and Environmental Quality*, 2nd edition. CRC Press, Boca raton, Florida. EE. UU. 28 p.
95. PINAMONTI, F. 1998. Compost mulch effects on soil fertility, nutritional status and performance of grapevine. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 239-248.
96. PINAMONTI, F., STRINGARI, G., GASPERI, F., ZORZI, G. 1997. The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 129-143.
97. PINTO, A. P., MOTA, A. M., DE VARENNES, A., PINTO, F. C. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Science of the Total Environment* 326:239-274.
98. PIOTROWSKA, M. 1997. Impact of soils amended with Zn and Pb smelter dust on Cd concentrations in potatoes. *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 319-322.
99. PLASTER, E. 2000. *La ciencia del suelo y su manejo*. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 412 p.
100. PRIETO, J., GONZÁLES, C., GUTIÉRREZ, R. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical And Subtropical Agroecosystems*. Vol. 10: p. 29 - 44.
101. QUINTERO, D. R. 2004. Efectos de la aplicación de elementos menores en caña de azúcar en suelos del valle del rio Cauca. *Centro de Investigación de la caña de azúcar en Colombia*, 14 p.
102. RAJENDRAN, P., MUTHUKRISHNAN, J., GUNASEKARAN, P. 2003. Microbes in heavy metal remediation. *Indian Journal of Experimental Biology*, 41: 935-944.

103. REVOREDO, A. 2018. Efecto del tratamiento con 3 cepas de estreptomicetos en la acumulación de cadmio en plantas de *Theobroma cacao* L. Tesis Licenciada en Biología. Lima, Perú. Universidad Cayetano Heredia. 95 p.
104. REYES, E., MARÍA, A. 2004. Contenido de metales pesados tóxicos (níquel, plomo, cobre, cadmio manganeso) en el cacao de la provincia Monseñor Nouel. En: Cacao. Resultados de Investigación. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias Forestales. Santo Domingo. p. 62 - 73.
105. REYES, M., BARRETO, L. 2011. Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. Madrid, España. 31 p.
106. REYES, M., BARRETO, L. 2011. Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. Revista Épsilon, N° 16. Enero-junio 2011. p. 31-45. [En línea]: Journal, (<https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/download/426/349>, documentos, 20 de set. 2017).
107. RIBES, A. 2002. Temperature and organic matter dependence of the distribution of organochlorine compounds in mountain soils from the subtropical atlantic (Teide, Tenerife Island). Environmental science and technology, 36 (9), 1879-1885.
108. RIEUWERTS, J. S., ASHMORE, M. R., FARAGO, M. E., THORNTON, I. 2006. The influence of soil characteristics on the extractability of Cd, Pb and Zn in upland and moorland soils. Science of The Total Environment, 366, 864-875.
109. RIFFO, C. 2016. Transferencia de metales pesados Cu, Pb, Zn, Ni, Co y Cr desde un suelo de la comuna de Talcahuano a las plantas *Salicornia* y *Lolium Perenne*. Tesis Ing. Civil. Concepción, Chile. Universidad católica de la Santísima Concepción. 137 p.
110. RODRÍGUEZ, F. 2009. Evaluación de cuatro bioestimulantes comerciales en el desarrollo de plantas injertadas de cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivar nacional. Tesis título Ing. Agrónomo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 99 p.

111. RODRÍGUEZ, M. 2007. Mecanismos moleculares de respuesta al cadmio en plantas de *Pisum sativum* L.: Función de las especies de oxígeno y nitrógeno reactivo. Tesis doctoral. Granada, España. Universidad de Granada. 254 p.
112. RODRÍGUEZ, M., MARTÍNEZ, D., ROMERO, M., DEL RÍO, L., SANDALIO, L. 2008. Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas*. 17 (3):139 -146.
113. RON, A. 2004. Ácidos húmicos y fúlvicos de origen orgánico en el crecimiento de plántula de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero. Tesis título Ing. Agrónomo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 53 p.
114. ROSAS, H. 2001. Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 72 p.
115. ROSCOE, R., OLIVEIRA, P. 2002. Fracionamento Físico do Solo em Estudos da Matéria Orgânica. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agropecuária Oeste Embrapa Solos Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Dourados, Brasil. 86 p.
116. RUDA DE SCHENQUER, E. 2004. Contaminación y salud del suelo. Centro de Tecnología Educativa Aplicada (CETEA). Facultad de Ingeniería Química, UNL. Santa Fe, Argentina. 99 p.
117. SADEGHIAN, S., RIVERA, J., GÓMEZ, M. 2000. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. Cali. Colombia. 19 p.
118. SALES, B. 2006. Caracterización de la materia orgánica de suelos representativos de ecosistemas amazónicos del Perú, departamento de Ucayali, e influencia de su uso y manejo en el secuestro de carbono. Tesis doctoral para optar el grado de doctor en ciencias químicas. Universidad de Sevilla, España. 162 p.
119. SÁNCHEZ, G. 2016. Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Trabajo de fin de grado. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense. España. 23 p.

120. SÁNCHEZ, M. 2010. Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de Moravia en Medellín: transferencia a flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas. Tesis doctoral en ciencias biológicas, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 164 p.
121. SÁNCHEZ, N. 2013. Modelización de los procesos químicos relacionados con la dinámica del cadmio en dos suelos agrícolas de Venezuela. Tesis doctoral para obtener el título de Doctora en Ingeniería. Universidad de Carabobo. Bárbula, Venezuela. 276 p.
122. SÁNCHEZ, N., RIVERO, C., MARTÍNEZ, Y. 2011. Cadmio disponible en dos suelos de Venezuela: efecto del fósforo. Universidad Central de Venezuela. Revista Ingeniería UC, Vol. 18, No. 2, 7-14. 8 p.
123. SANTIAGO, A. 2013. Papel de los constituyentes edáficos en la disponibilidad de metales pesados en suelos calcáreos de uso agrícola del área mediterránea. Enfoque químico y biológico. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España. 292 p.
124. SANTIAGO, A. 2013. Papel de los constituyentes edáficos en la disponibilidad de metales pesados en suelos calcáreos de uso agrícola del área Mediterránea. Enfoque químico y biológico. Tesis doctoral. Universidad complutense de Madrid. Madrid, España. 292 p.
125. SANTIBÁÑEZ, V. C. 2006. Uso de Biosólidos de plantas de tratamiento de aguas servidas para la fitoestabilización de tranques de relaves. Tesis Dr. Ciencias silvoagropecuarias y Veterinarias. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 110 p.
126. SARANGO, C. 2009. Efecto de tres niveles de fertilización química en el cultivo de cacao *Theobroma cacao* L., variedad ramilla CCN-51, Parroquia San Jacinto del Búa – Cantón Santo Domingo. Tesis Ing. Administración y Producción Agropecuaria. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. 183 p.
127. SCHMIDT, M., NOACK, A. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, Washingt, v. 14, p. 777-793.

128. SELLÉS, G., FERREYRA, R., RUIZ, R., FERREYRA, B., AHUMADA, R. 2012. Compactación de suelos y su control: Estudio de casos en el Valle de Aconcagua. Instituto de investigaciones agropecuarias. Santiago, Chile. 56 p.
129. SERRANO, J. 2000. Efecto del encalado sobre el complejo organomineral de dos andosoles del macizo Xalapa-Coatepec, Veracruz. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. 127 p.
130. SHAH, K., NONGKYNRIH, J.M. 2007. Metal hyperaccumulator and bioremediation. *Biologia Plantarum* 51:618-634.
131. SILVA, C. 2004. Adsorcao competitiva de cadmio, cobre, níquel e zinco em solos. Tesis Mestre em agronomia, área de concetracao: Solos e nutricao de plantas. Piracicaba, Estado de Sao paulo, Brazil. 79 p.
132. SILVEIRA, M.L.A., ALLEONI, L.R.F., GUILHERME, L.R.G. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agrícola*. 60: 793-806. [En línea]: Journal, (<http://www.file:///C:/Users/HP/Downloads/21922-25554-1-PB.pdf>, PDF, 23 set. 2017).
133. SMOLDERS, E., SIX, L. 2013. Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils. Heverlee, Belgium. 58 p. [En Línea]: Documentos, (http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/environmental_risks/docs/scher_o_168_rd_en.pdf, PDF, 30 abr. 2018).
134. SOLER-ROVIRA, P., MADEJÓN, E., MADEJÓN, P., PLAZA, C. 2010. In situ remediation of metal-contaminated soils with organic amendments: Role of humic acids in copper bioavailability. *Chemosphere*, 79, 844-849.
135. SULFATOS NATURALES OCUCAJE S.A.C. 2016. Magnocal. Ica, Perú. 6 p. [En línea]: Magnocal, (<http://www.sulfatosnaturales.com/Productos/magnocal.html>, PDF, 16 de oct. 2016).
136. SWIFT, R.S. 1996. Organic matter characterization. In *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, SSSA book series 5, ed. D.L. Sparks, 1011–1069. Madison: Soil Science Society of America.

137. TILLER, K.G. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. *Advances in soil science*, 9, p. 113-142.
138. VARNERO, M. T. 2001. Desarrollo de substratos orgánicos: compost y bioabonos. *Publicaciones misceláneas forestales*. Universidad de Chile. 29 p.
139. VÁSQUEZ, M., GÓMEZ, D. 2011. Abonos orgánicos. Tegucigalpa, Honduras. 27 p. [En línea]: Metrocert, (<http://www.pymerural.org/abonos/>, PDF, 25 set. 2017).
140. VENEGAS, A. 2008. Caracterización de la materia orgánica de Suelos de praderas naturales y cultivadas de la IX región. Tesis Ing. Químico. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile. 58 p.
141. WANG, K., XING, B. 2005 Chemical extractions affect the structure and phenanthrene sorption of soil humin. *Environ. Sci. Technol.* 39 (21): 8333-8340.
142. YALÇINKAYA, Y. 2001. Biosorption of cadmium from aquatic systems by carboxymethylcellulose and immobilized *Trametes versicolor*. *Hydrometallurgy*. Vol. 63: p. 31- 40.
143. ZAGAL, E., RODRÍGUEZ, N., VIDAL, I., FLORES, A. 2002. La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. *Agric. Téc.* vol.62 no.2. doi.org/10.4067/S0365-28072002000200011. Chillán, Chile. 10 p.
144. ZHANG, M. 2011. Adsorption study of Pb (II), Cu (II) and Zn (II) from simulated acid mine drainage using dairy manure compost. *Chemical Engineering Journal*, In Press, Corrected Proof.

IX. ANEXO



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAS CACAO ALTO HUALLAGA

Departamento : HUANUCO
 Distrito : RUPA,RUPA
 Referencia : H.R.57365-007C-17

Fact.: 102

Provincia : LEONCIO PRADO
 Predio : TINGO MARIA
 Fecha : 27/01/17

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
548	PITEIS-13	4.06	0.39	0.00	2.15	23.3	78	22	48	30	Fr.Ar.	13.12	2.28	0.40	0.19	0.07	1.70	4.64	2.94	22
549	PITEIS-14	4.44	0.35	0.00	3.59	3.4	173	32	32	36	Fr.Ar.	19.20	6.08	0.88	0.38	0.07	2.80	10.21	7.41	39
550	PITEIS-15	4.24	0.46	0.00	2.84	5.7	111	56	28	16	Fr.A.	13.60	3.00	0.63	0.22	0.06	0.70	4.61	3.91	29
551	PITEIS-16	5.33	0.44	0.00	4.14	11.3	208	46	38	16	Fr.	19.84	12.00	2.85	0.44	0.09	0.20	15.58	15.38	78

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Pb ppm	Cd ppm
Lab	Claves		
548	PITEIS-13	165.89	0.91
549	PITEIS-14	93.04	0.07
550	PITEIS-15	98.52	0.06
551	PITEIS-16	69.58	0.40



Dr. Sady García Bendezi
 Jefe del Laboratorio

Figura 33. Análisis físico-químico inicial del suelo (clave PITEIS-13).

Cuadro 28. Análisis físico químico del suelo por cada tratamiento en estudio.

COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA						DISTRITO: CASTILLO GRANDE					PROVINCIA: LEONCIO PRADO					REGIÓN: HUÁNUCO		
N°	Bloque/ Tratam.	Análisis mecánico				pH (1:1)	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	Cationes cambiabiles (meq/100 g)					CICe meq/ 100g	Bas. Camb. %	Ac. Camb. %
		Arena	Limo	Arcilla	Clase textural						Ca	Mg	K	Na	Al + H			
		%	%	%														
1	BIT0	13.62	53.65	32.73	Franco Arcillo Limoso	4.25	2.41	0.11	9.39	42.00	1.93	0.69	0.11	0.16	1.44	4.33	66.74	33.26
2	BIT1	17.62	51.64	30.74	Franco Arcillo Limoso	4.30	3.45	0.16	10.47	63.40	2.16	0.82	0.16	0.17	1.30	4.61	71.80	28.20
3	BIT2	18.60	45.64	35.76	Franco Arcillo Limoso	3.96	2.52	0.11	8.01	20.80	1.57	0.87	0.05	0.15	1.84	4.48	58.93	41.07
4	BIT3	17.47	49.77	32.76	Franco Arcillo Limoso	4.37	2.97	0.13	8.12	32.20	1.86	1.17	0.08	0.16	1.49	4.76	68.70	31.30
5	BIT4	16.45	56.77	26.78	Franco Limoso	5.24	3.62	0.16	13.61	103.40	2.57	1.32	0.26	0.18	1.00	5.33	81.24	18.76
6	BIT5	18.45	49.79	31.76	Franco Arcillo Limoso	5.18	3.14	0.14	11.08	49.60	2.34	1.61	0.13	0.16	1.00	5.24	80.92	19.08
7	BIT6	14.43	47.80	37.77	Franco Arcillo Limoso	3.81	2.31	0.10	8.56	42.40	1.45	0.59	0.11	0.18	2.18	4.51	51.66	48.34
8	BIIT0	15.59	48.01	36.40	Franco Arcillo Limoso	4.09	2.72	0.12	7.79	51.20	1.73	0.63	0.13	0.21	1.73	4.43	60.95	39.05
9	BIIT1	23.58	42.00	34.42	Franco Arcilloso	4.43	2.86	0.13	9.65	101.80	1.84	0.93	0.26	0.15	1.54	4.72	67.37	32.63
10	BIIT2	17.60	54.03	28.37	Franco Arcillo Limoso	5.14	4.41	0.20	8.68	40.80	2.85	1.35	0.10	0.17	1.00	5.47	81.72	18.28
11	BIIT3	20.60	49.99	29.41	Franco Arcilloso	4.39	3.55	0.16	9.78	61.40	2.14	1.13	0.16	0.23	1.27	4.93	74.24	25.76
12	BIIT4	16.58	43.04	40.38	Franco Limoso	5.08	2.90	0.13	11.27	93.60	2.59	1.44	0.24	0.26	1.00	5.53	81.92	18.08
13	BIIT5	15.58	47.03	37.39	Franco Arcillo Limoso	4.83	2.86	0.13	12.86	87.80	2.11	1.43	0.22	0.13	1.14	5.03	77.34	22.66
14	BIIT6	13.61	50.99	35.40	Franco Arcillo Limoso	4.59	2.69	0.12	8.34	37.20	2.43	0.73	0.10	0.17	1.11	4.54	75.55	24.45
15	BIIT0	16.61	43.00	40.39	Arcilloso Limoso	3.90	2.52	0.11	9.95	95.60	1.56	0.77	0.24	0.28	1.77	4.62	61.69	38.31
16	BIIT1	22.62	47.98	29.40	Franco Arcilloso	4.95	3.62	0.16	16.06	135.80	2.65	1.52	0.35	0.27	1.00	5.79	82.73	17.27
17	BIIT2	18.60	46.02	35.38	Franco Arcillo Limoso	4.28	3.21	0.14	8.71	58.80	2.11	1.43	0.15	0.29	1.33	5.31	74.95	25.05
18	BIIT3	21.58	46.03	32.39	Franco Arcilloso	5.17	3.21	0.14	7.39	54.40	2.39	1.89	0.14	0.19	1.00	5.61	82.17	17.83
19	BIIT4	17.61	49.01	33.38	Franco Arcillo Limoso	4.44	2.72	0.12	9.42	59.60	2.15	1.03	0.15	0.18	1.27	4.78	73.43	26.57
20	BIIT5	19.59	42.03	38.38	Franco Arcillo Limoso	4.24	2.66	0.12	9.95	67.40	1.95	1.01	0.17	0.20	1.71	5.04	66.07	33.93
21	BIIT6	23.60	40.01	36.39	Franco Arcilloso	4.10	2.45	0.11	8.25	75.60	1.58	0.71	0.19	0.24	1.94	4.66	58.37	41.63
22	BIVT0	23.58	40.00	36.42	Franco Arcilloso	4.17	2.45	0.11	11.62	34.60	1.62	0.73	0.09	0.19	1.80	4.43	59.37	40.63
23	BIVT1	30.60	45.00	24.40	Franco	5.50	3.76	0.17	9.43	68.80	2.80	1.34	0.18	0.19	1.00	5.51	81.85	18.15
24	BIVT2	24.62	45.00	30.38	Franco Arcilloso	4.59	3.28	0.15	12.53	38.00	1.90	1.19	0.10	0.14	1.21	4.54	73.35	26.65
25	BIVT3	27.58	48.03	24.39	Franco	5.43	3.14	0.14	5.50	62.60	2.45	1.88	0.16	0.17	1.00	5.66	82.33	17.67
26	BIVT4	21.58	44.02	34.40	Franco Arcilloso	4.75	2.24	0.10	12.16	155.20	2.02	1.14	0.40	0.22	1.24	5.02	75.30	24.70
27	BIVT5	26.58	43.02	30.40	Franco Arcilloso	4.74	3.14	0.14	9.82	72.60	2.10	1.21	0.19	0.16	1.21	4.87	75.15	24.85
28	BIVT6	25.60	44.00	30.40	Franco Arcilloso	4.11	2.45	0.11	11.13	35.80	1.82	0.77	0.09	0.15	1.54	4.37	64.76	35.24

Cuadro 29. Cadmio en suelo, fracciones de la materia orgánica y granos de cacao.

Bloc/ trata	Cadmio en suelo		Cadmio en la Fracción física			Cadmio en la Fracción química			Cadmio
	Cd (ppm)	Cd (ppm)	Cadmio (ppm)			Cadmio (ppm)			ppm
	Disponible	Total	Fracción liviana libre	Fracción liviana oclusa	Fracción pesada	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos	Humina	Granos de cacao
BIT0	0.265	0.850	0.323	0.206	0.003	0.300	0.384	0.410	0.33
BIT1	0.241	0.750	0.262	0.262	0.003	0.320	0.192	0.409	0.87
BIT2	0.224	0.850	0.311	0.301	0.003	0.340	0.320	0.386	0.28
BIT3	0.249	0.900	0.291	0.213	0.003	0.340	0.320	0.495	0.35
BIT4	0.272	0.900	0.187	0.283	0.269	0.340	0.256	0.479	0.47
BIT5	0.249	0.900	0.317	0.304	0.003	0.320	0.384	0.472	0.16
BIT6	0.241	0.850	0.406	0.328	0.003	0.320	0.256	0.409	0.41
BIIT0	0.232	0.800	0.282	0.243	0.003	0.340	0.320	0.499	0.45
BIIT1	0.249	0.800	0.391	0.400	0.003	0.360	0.320	0.474	0.19
BIIT2	0.249	0.800	0.447	0.425	0.003	0.340	0.192	0.438	0.31
BIIT3	0.249	0.750	0.376	0.213	0.003	0.300	0.256	0.478	0.32
BIIT4	0.232	0.850	0.442	0.273	0.003	0.340	0.192	0.366	0.39
BIIT5	0.224	0.850	0.500	0.318	0.003	0.340	0.192	0.406	0.41
BIIT6	0.232	0.800	0.506	0.299	0.003	0.340	0.192	0.480	0.46
BIIT0	0.232	0.900	0.492	0.263	0.140	0.320	0.320	0.417	0.17
BIIT1	0.249	0.750	0.529	0.208	0.003	0.360	0.192	0.374	0.18
BIIT2	0.214	0.900	0.506	0.213	0.003	0.320	0.256	0.299	0.19
BIIT3	0.224	0.850	0.362	0.243	0.003	0.360	0.192	0.178	0.30
BIIT4	0.257	0.900	0.414	0.243	0.003	0.360	0.128	0.336	0.30
BIIT5	0.224	0.800	0.698	0.182	0.141	0.380	0.128	0.242	0.13
BIIT6	0.249	0.850	0.453	0.365	0.003	0.380	0.320	0.412	0.54
BIVT0	0.257	0.850	0.795	0.213	0.003	0.340	0.128	0.432	0.12
BIVT1	0.249	0.850	0.519	0.273	0.003	0.360	0.320	0.378	0.55
BIVT2	0.806	0.800	0.569	0.304	0.003	0.340	0.256	0.425	0.24
BIVT3	0.338	0.950	0.710	0.243	0.141	0.340	0.256	0.394	0.42
BIVT4	0.232	0.800	0.667	0.243	0.003	0.380	0.256	0.355	0.27
BIVT5	0.257	0.800	0.498	0.304	0.003	0.340	0.256	0.257	0.56
BIVT6	0.224	0.830	0.450	0.340	0.003	0.350	0.260	0.450	0.34

Cuadro 30. Cuadrados medios y significación ($\alpha = 0.05$) para cadmio disponible, cadmio total en suelo y cadmio en almendras de cacao.

Fuente de variación	G.L.	Cd disponible		Cd total		Cd Granos	
		CM	Sig.	CM	Sig.	CM	Sig.
Tratamiento	6	0.01	NS	0.003	NS	0.02	NS
Bloque	3	0.01	NS	0.003	NS	0.03	NS
Error	18	0.01		0.003		0.03	
Total	27						
C.V (%)		37.73		6.01		28.57	

Cuadro 31. Prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para cadmio disponible, cadmio total en suelo y cadmio en almendras de cacao por tratamiento en estudio.

Cadmio disponible			Cadmio total			Cadmio almendras		
Clave	ppm	Sig.	Clave	ppm	Sig.	Clave	ppm	Sig.
T ₂	0.37	a	T ₄	0.86	a	T ₆	0.25	a
T ₃	0.27	a	T ₃	0.86	a	T ₁	0.35	a
T ₄	0.25	a	T ₀	0.85	a	T ₄	0.36	a
T ₀	0.25	a	T ₅	0.84	a	T ₃	0.27	a
T ₁	0.23	a	T ₂	0.84	a	T ₅	0.45	a
T ₅	0.24	a	T ₆	0.83	a	T ₀	0.32	a
T ₆	0.24	a	T ₁	0.79	a	T ₂	0.44	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes

Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha

Cuadro 32. Resistencia de penetración al suelo (kg/cm²) por tratamiento en estudio.

Id.	Tratamiento	Bloque				Promedio
		I	II	III	IV	
1	T ₀	2.07	2.27	2.17	1.55	2.02
2	T ₁	1.95	2.23	2.28	2.20	2.17
3	T ₂	2.28	2.17	2.35	2.15	2.24
4	T ₃	2.20	2.37	2.13	1.83	2.13
5	T ₄	2.43	2.38	2.12	2.37	2.33
6	T ₅	2.18	2.32	2.42	2.22	2.29
7	T ₆	2.00	2.23	2.28	2.57	2.27
Promedio general						2.20

Leyenda:

T₀ = Testigo

T₂ = Dolomita 2.00 t/ha

T₄ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 2.00 t/ha

T₆ = Magnocal 3.00 t/ha

T₁ = Compost 30.00 t/ha

T₃ = Dolomita 4.00 t/ha

T₅ = Compost 30.00 t/ha + dolomita 4.00 t/ha



SOLICITANTE COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
MATRIZ ALMENDRAS DE CACAO
LUGAR CASTILLO GRANDE - LEONCIO PRADO
FECHA DE RECEP. 22/09/2018

INFORME DE ANÁLISIS DE FRUTO - ESPECIAL

NRL	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA (LISTA)	Cadmio (Cd) (mg/Kg)
947-61FRUT -2018	N8	0.51
947-62FRUT -2018	N9	0.41
947-63FRUT -2018	N10	0.66
947-64FRUT -2018	N11	0.16
947-65FRUT -2018	N12	0.56
947-66FRUT -2018	N60	0.50
947-67FRUT -2018	N13	0.45
947-68FRUT -2018	N14	0.31
947-69FRUT -2018	N15	0.19
947-70FRUT -2018	N16	0.41
947-71FRUT -2018	N17	0.41
947-72FRUT -2018	N18	0.39
947-73FRUT -2018	N19	0.32
947-74FRUT -2018	N20	0.54
947-75FRUT -2018	N21	0.44
947-76FRUT -2018	N22	0.46
947-77FRUT -2018	N23	0.53
947-78FRUT -2018	N24	0.41
947-79FRUT -2018	N25	0.57
947-80FRUT -2018	N61	0.38

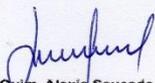
Los resultados están expresados en muestra Seca a 70°C (Almendras de Cacao)

TÉCNICA USADA PARA LA DETERMINACIÓN DE CADMIO.

FAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Llama
AOAC Official Method 999.11

NOTA:

- 1: Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada.
- 2: Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente informe sin la autorización del Laboratorio de Química Agrícola.


MSc. Quím. Alexis Saucedo Chacón
JEFE DEL LABORATORIO




MSc. Agr. Julio Castro Lazo
DIRECTOR DEL LABORATORIO

Figura 34. Análisis de cadmio total en el grano de cacao.



SOLICITANTE : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
 PREDIO : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
 MATRIZ : ENMIENDA ORGÁNICA

ANÁLISIS N° : 136-01EOS-2019
 LUGAR : TINGO MARIA
 FECHA DE RECEP. : 16/06/17

INFORME DE ANÁLISIS DE ENMIENDA ORGÁNICA SÓLIDA - NUTRICIONAL
MUESTRA : COMPOST

PARAMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	TÉCNICA
pH a T = 25.6 °C (E.S)	6.69		MEOS - 001	Electrométrico
Conductividad Eléctrica a 25 °C.(E.S.)	50.90	dS/m	MEOS - 002	Electrométrico
Carbonato de Calcio	< 0.01	%	MEOS - 003	Gravimétrico
Humedad	31.55	%	MEOS - 004	Gravimétrico
Materia Orgánica	18.98	%	MEOS - 005	Gravimétrico
Carbono Orgánico	11.01	%	-----	-----
Cenizas Totales	13.67	%	MEOS - 006	Gravimétrico
Impurezas	35.80	%	MEOS - 007	Gravimétrico
Nitrógeno Total (N _T)	1.18	%	MEOS - 008	Dumas
Fósforo Total (P ₂ O ₅)	1.75	%	MEOS - 009	Colorimétrico
Potasio Total (K ₂ O)	2.02	%	MEOS - 010	FAAS
Calcio Total (CaO)	3.38	%	MEOS - 011	FAAS
Magnesio Total (MgO)	0.92	%	MEOS - 012	FAAS
Azufre Total (S)	0.39	%	MEOS - 013	Turbidimétrico
Sodio Total (Na)	0.77	%	MEOS - 014	FAAS
Cloro Total (Cl)	0.41	%	MEOS - 015	Argentométrico
Cobre Total (Cu)	21.27	ppm	MEOS - 016	FAAS
Zinc Total (Zn)	145.78	ppm	MEOS - 017	FAAS
Manganeso Total (Mn)	199.72	ppm	MEOS - 018	FAAS
Hierro Total (Fe)	2343.95	ppm	MEOS - 019	FAAS
Boro Total (B)	66.66	ppm	MEOS - 020	Colorimétrico
C / N	9.33		-----	-----
Cadmio Total (Cd)	0.22	ppm	AOAC 999.11	FAAS

Los resultados están expresados en muestra original.

DONDE:

% : Masa / Masa
 ppm : mg / Kg
 (E.S) : Extracto de Saturación

FAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Llama
 MEOS : Método Propio del Laboratorio.

NOTA:

1: Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada.

MSc. Quím. Alexis Saucedo Chacón
 JEFE DEL LABORATORIO



MSc. Agr. Julio Castro Lazo
 DIRECTOR DEL LABORATORIO

Figura 35. Análisis químico del compost.



SOLICITANTE : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
 PREDIO : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
 MATRIZ : ENMIENDA INORGÁNICA

ANÁLISIS Nº : 136-01EIS -2019
 LUGAR : TINGO MARIA
 FECHA DE RECEP. : 16/06/17

INFORME DE ANÁLISIS DE ENMIENDA INORGÁNICA SÓLIDA - NUTRICIONAL
MUESTRA : DOLOMITA

PARAMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	TÉCNICA
pH a T = 27.8 °C (1/100)	9.29		MEIS - 001	Electrométrico
Conductividad Eléctrica a 25 °C.(1/100)	0.07	dS/m	MEIS - 002	Electrométrico
Carbonato de Calcio	94.69	%	MEIS - 003	Gravimétrico
Humedad	1.93	%	MEIS - 004	Gravimétrico
Fósforo Total (P2O5)	0.02	%	MEIS - 005	Colorimétrico
Potasio Total (K2O)	0.01	%	MEIS - 006	FAAS
Calcio Total (CaO)	30.04	%	MEIS - 007	FAAS
Magnesio Total (MgO)	20.58	%	MEIS - 008	FAAS
Azufre Total (S)	0.19	%	MEIS - 009	Turbidimétrico
Sodio Total (Na)	0.05	%	MEIS - 010	FAAS
Cloro Total (Cl)	0.04	%	MEIS - 011	Argentométrico
Cobre Total (Cu)	2.00	ppm	MEIS - 012	FAAS
Zinc Total (Zn)	8.00	ppm	MEIS - 013	FAAS
Manganeso Total (Mn)	185.00	ppm	MEIS - 014	FAAS
Hierro Total (Fe)	562.00	ppm	MEIS - 015	FAAS
Boro Total (B)	530.00	ppm	MEIS - 016	Colorimétrico
Cadmio Total (Cd)	0.20	ppm	AOAC 999.11	FAAS

Los resultados están expresados en muestra original.

DONDE:

% : Masa / Masa
 ppm : mg / Kg
 (1 / 100) : Relación: Masa /Volumen

FAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Llama
 MEIS : Método Propio del Laboratorio.

NOTA:

- 1: Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada.
- 2: Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente informe sin la autorización del Laboratorio de Química Agrícola.

MSc. Quím. Alexis Saucedo Chacón
JEFE DEL LABORATORIO



MSc. Agr. Julio Castro Lazo
DIRECTOR DEL LABORATORIO

Figura 36. Análisis químico de la dolomita.



SOLICITANTE : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
 PREDIO : COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL CACAO ALTO HUALLAGA
 MATRIZ : ENMIENDA INORGÁNICA

ANÁLISIS N° : 136-02EIS -2019
 LUGAR : TINGO MARIA
 FECHA DE RECEP. : 16/06/17

INFORME DE ANÁLISIS DE ENMIENDA INORGÁNICA SÓLIDA - NUTRICIONAL
MUESTRA : MAGNOCAL

PARAMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	TÉCNICA
pH a T = 27.6 °C (1/100)	7.67		MEIS - 001	Electrométrico
Conductividad Eléctrica a 25 °C,(1/100)	2.52	dS/m	MEIS - 002	Electrométrico
Carbonato de Calcio	0.22	%	MEIS - 003	Gravimétrico
Humedad	17.58	%	MEIS - 004	Gravimétrico
Fósforo Total (P ₂ O ₅)	1.17	%	MEIS - 005	Colorimétrico
Potasio Total (K ₂ O)	0.17	%	MEIS - 006	FAAS
Calcio Total (CaO)	11.70	%	MEIS - 007	FAAS
Magnesio Total (MgO)	2.25	%	MEIS - 008	FAAS
Azufre Total (S)	7.80	%	MEIS - 009	Turbidimétrico
Sodio Total (Na)	0.90	%	MEIS - 010	FAAS
Cloro Total (Cl)	0.36	%	MEIS - 011	Argentométrico
Cobre Total (Cu)	13.00	ppm	MEIS - 012	FAAS
Zinc Total (Zn)	45.00	ppm	MEIS - 013	FAAS
Manganeso Total (Mn)	211.00	ppm	MEIS - 014	FAAS
Hierro Total (Fe)	11688.30	ppm	MEIS - 015	FAAS
Boro Total (B)	630.00	ppm	MEIS - 016	Colorimétrico
Cadmio Total (Cd)	36.85	ppm	AOAC 999.11	FAAS

Los resultados están expresados en muestra original.

DONDE:

% : Masa / Masa
 ppm : mg / Kg
 (1/ 100) : Relación: Masa /Volumen

FAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Llama
 MEIS : Método Propio del Laboratorio.

NOTA:

- 1: Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada.
- 2: Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente informe sin la autorización del Laboratorio de Química Agrícola.

MSc. Quím. Alexis Saucedo Chacón
 JEFE DEL LABORATORIO



MSc. Agr. Julio Castro Lazo
 DIRECTOR DEL LABORATORIO

Figura 37. Análisis químico del magnocal.

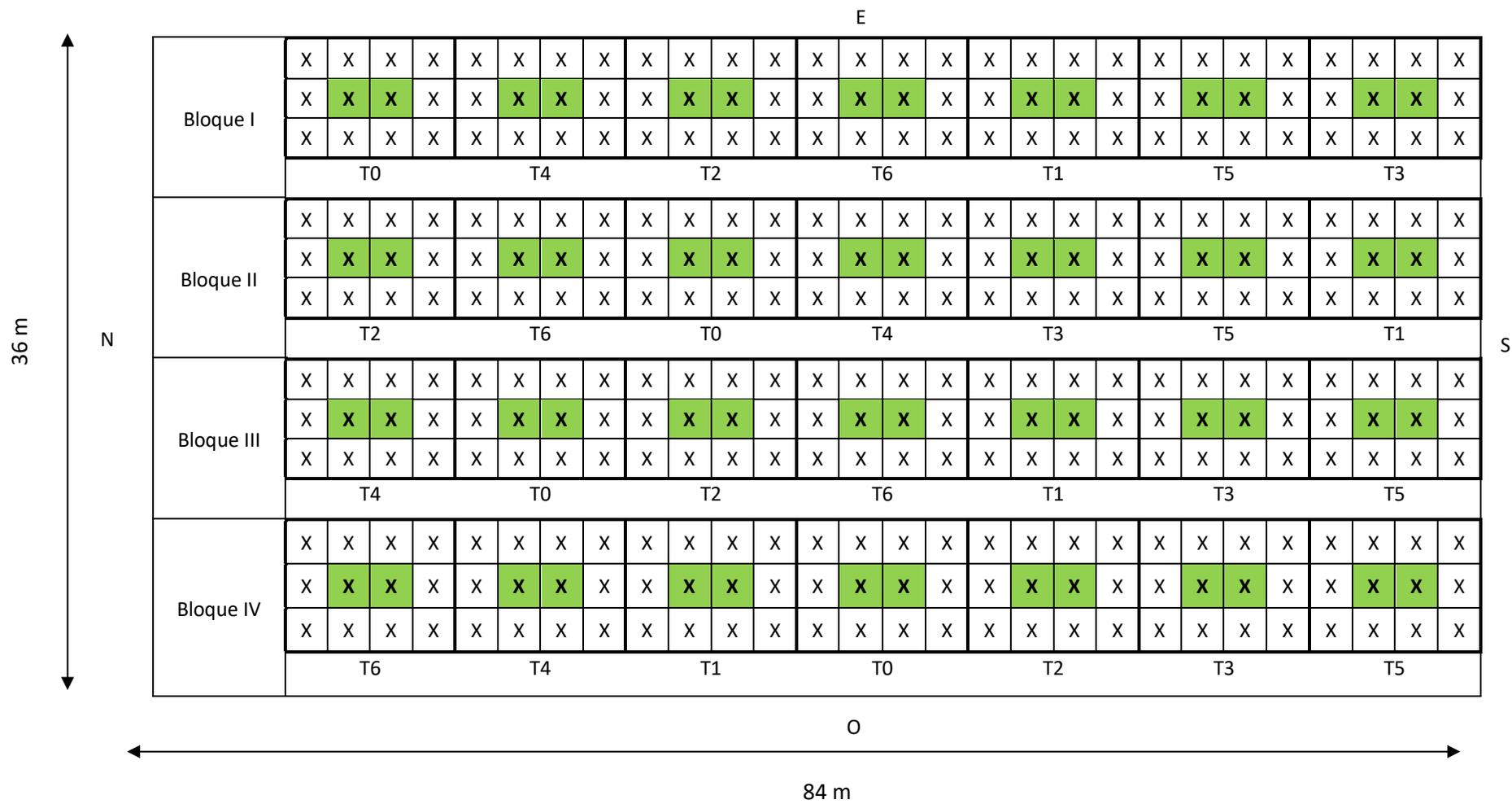
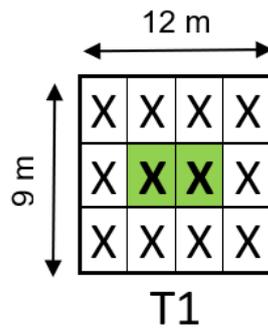


Figura 38. Croquis del campo experimental.



Legenda:

X = Plantas de cacao

X = Plantas de cacao a evaluar (parcela neta)

Figura 39. Croquis de la unidad experimental.



Figura 40. Magnocal utilizado en el experimento.

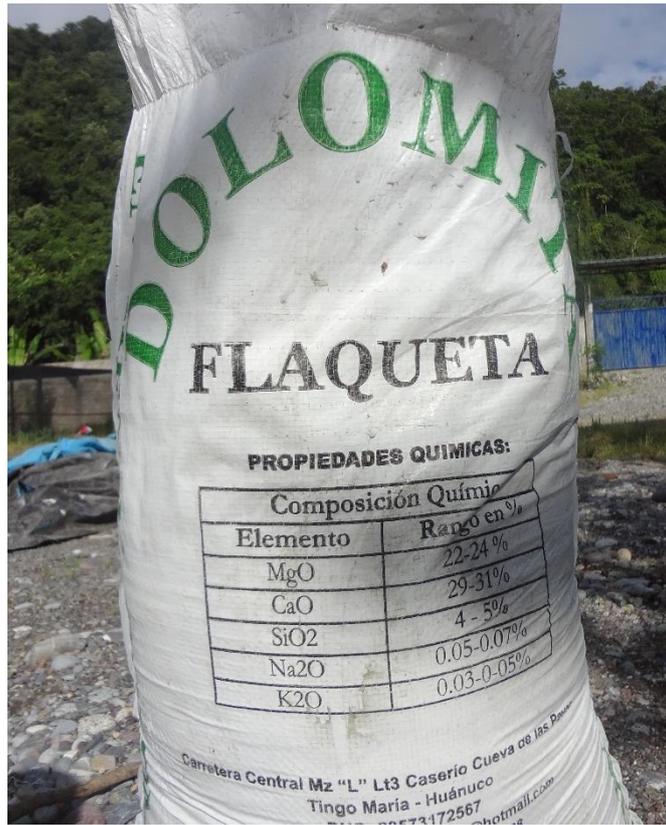


Figura 41. Dolomita utilizada en el experimento.



Figura 42. Identificación de los tratamientos en campo (tratamiento T₀).



Figura 43. Verificación de la tesis por el presidente del jurado.



Figura 44. Forma de muestreo de suelo.



Figura 45. Muestreo de suelo.



Figura 46. Muestreo del grano de cacao (cosecha).



Figura 47. Secado de los granos de cacao.



Figura 48. Fraccionamiento de la materia orgánica.