

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Departamento Académico de Ciencias Agrarias



**“PRESENCIA DE CADMIO EN ALGUNAS PARCELAS DE
CACAO ORGÁNICO EN LA COOPERATIVA AGRARIA
INDUSTRIAL NARANJILLO - TINGO MARÍA - PERÚ.”**

TESIS

Para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

ALVARO ANDRÉS CÁRDENAS MORALES

PROMOCIÓN I - 2011

Tingo María - Perú

2012



P33

C26

Cárdenas Morales, Álvaro Andrés

Presencia de Cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo – Tingo María - Perú

106 páginas; 18 cuadros; 07 fgrs.; 114 ref.; 30 cm.

Tesis (Ing. en Agronomía) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Facultad de Agronomía

1. CADMIO

2. CASCARILLA

3. SUELO

4. FOLIAR

5. ALMENDRA

6. CACAO

DEDICATORIA

A Dios: sobre todas las cosas,
por iluminarme y darme sus
bendiciones durante todo el
proceso de mi formación
profesional.

A mis queridos padres:
Segundo Cárdenas Lezcano y
Dolores Morales Roncal, mi
más profundo agradecimiento
por sus consejos y esfuerzo
para la culminación de mi
carrera profesional.

A mis hermanos: Segundo,
Domingo y Marcelo por su
apoyo moral y sus consejos en
el proceso de mi formación
como profesional.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por ser el alma mater donde culminare mi carrera profesional.
- A la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo.
- A la Facultad de Agronomía, por haberme formado como profesional.
- Al Blgo. MSc. Miguel A. Huauya Rojas, por su valiosa orientación como asesor.
- Al Ing. MSc. José Wilfredo Zavala Solórzano, por su colaboración en el trabajo como coasesor.
- A los miembros de jurado: Hugo Huamaní Yupanqui, Luis Mansilla Minaya y Jaime Chávez Matías, por su valiosa colaboración en el trabajo.
- A los bachilleres: Alain René Fonseca Adrianzen, Max Augusto Ramírez Rojas, Ernesto Peso Murrieta, y Erlith Muñoz García por su colaboración en el presente trabajo.
- A todas aquellas personas que directa o indirectamente hicieron posible la culminación del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	9
II. REVISIÓN DE LITERATURA	11
2.1. Del cacao	11
2.2. Metales pesados en suelos agrícolas	12
2.3. Origen de la contaminación del suelo por metales pesados	15
2.3.1. Origen natural.....	15
2.3.2. Origen antropogénico	15
2.4. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados en los suelos.....	20
2.4.1. El pH.....	20
2.4.2. Materia orgánica	24
2.4.3. Calcio.....	25
2.4.4. Composición granulométrica o clase textural de los suelos.	26
2.4.5. Carbonatos	26
2.4.6. Óxidos de hierro y manganeso	27
2.5. Absorción y traslocación de metales pesados en las plantas	28
2.6. Cadmio.....	30
2.6.1. Cadmio en el suelo	32
2.6.2. Fuentes de contaminación del Cadmio.....	33
2.6.3. Ingreso del Cadmio en la cadena trófica.....	34
2.6.4. Ingreso transporte y acumulación del cadmio en plantas	35

2.6.5. Toxicidad del Cadmio en plantas.....	37
2.6.6. Estrategias de tolerancia al Cadmio	40
2.7. Calidad del suelo.....	41
2.7.1. Evaluación de la calidad del suelo	42
2.7.2. Indicadores de calidad del suelo.....	42
2.7.3. Indicadores biológicos del suelo	43
2.7.4. Indicadores para evaluar la calidad del suelo en relación a los metales pesados	43
2.7.5. Macrofauna del suelo.....	45
2.7.6. Actividad microbiana del suelo	46
2.8. Efectos del Cadmio en la salud humana.....	46
III. MATERIALES Y METODOS	48
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
V. CONCLUSIONES	86
VI. RECOMENDACIONES	88
VII. RESUMEN	89
VII. BIBLIOGRAFÍA	90
VIII. ANEXO.....	108

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1. Metales pesados en suelos y plantas terrestres	12
2. Concentración típica de metales pesados en las principales tipos de rocas	16
3. Niveles máximos de metales pesados en productos alimenticios y cacao	30
4. Propiedades del Cadmio	31
5. Georeferenciación de las parcelas evaluadas	48
6. Métodos usados para los análisis físico-químico de los suelos.....	51
7. Resultados de los análisis de suelos de las parcelas evaluadas en la COOPAIN	58
8. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunas propiedades físico químicas del suelo.....	62
9. Concentración foliar de macro y micro elementos de cacaotales de la COOPAIN	66
10. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunos macro y micro elementos a nivel foliar.....	68
11. Concentración de macro y micro elementos en almendras sin cascarilla de cacaotales de la COOPAIN.....	70
12. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunos macro y micro elementos a nivel de almendra.....	72

13.	Contenido de Cadmio disponible en el suelo, Cadmio total en tejido foliar, almendras y cascarilla de cacao	73
14.	Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y contenido de Cadmio total a nivel foliar, almendra y cascarilla	74
15.	Densidad de la macrofauna del suelo.....	77
16.	Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunos órdenes de macrofauna.....	80
17.	Evaluación de la actividad microbiana.....	81
18.	Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y la respiración microbiana del suelo.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Pág.
1. Fuentes y factores de contaminación en el sistema suelo-planta	20
2. Mecanismos de ingreso, secuestro y traslocación del Cadmio en las raíces	36
3. Esquema de la respuesta celular al Cadmio	39
4. Concentración de Cadmio disponible en el suelo	60
5. Concentración de Cadmio total a nivel foliar	67
6. Concentración de Cadmio total en almendras sin cascarilla de cacao... ..	71
7. Composición porcentual de los órdenes de macrofauna del suelo	78
8. Metodología de análisis de Cadmio disponible	109
9. Metodología de análisis de Cadmio total vía seca	109
10. Muestreo de los campos evaluados	111
11. Recolección del monolito de suelo para el análisis de macrofauna	111
12. Muestreo de hojas de cacao	112
13. Muestreo de las mazorcas de cacao	112
14. Secado de las almendras de cacao	113
15. Realización de los análisis en el laboratorio de suelo	113
16. Mapa de la distribución espacial del Cadmio de las zonas muestreadas	114

I. INTRODUCCIÓN

El cacao orgánico representa uno de los principales cultivos de la provincia de Leoncio Prado - Huánuco. El principal mercado de este cultivo es el externo presentándose los mayores niveles de exportación hacia Holanda, Suiza, Bélgica, Francia, Italia, Alemania, Estados Unidos, Japón y otros. Estos países presentan determinadas condiciones para el ingreso y comercialización de cacao, y uno de ellos es la presencia de metales pesados; el mercado europeo está presentando observaciones respecto a la presencia del cadmio en el producto de cacao que se está enviando y que está superando los límites máximos permisibles.

Es por ello que se hace imperioso evaluar la presencia y los niveles de contaminación del cadmio a nivel del suelo, foliar y grano de los agricultores de la Cooperativa Agraria Naranjillo.

El cultivo de cacao orgánico representa para la provincia de Leoncio Prado una importante actividad socio - económica, toda vez que gracias a la exportación principalmente al mercado europeo genera divisas para los agricultores. Es por ello que el reporte sobre la presencia de niveles de cadmio por encima de lo permitido en el producto enviado al extranjero genera preocupación en relación a los posteriores envíos de este producto.

Los análisis de laboratorio permiten determinar el contenido de cadmio en el suelo, en las almendras, en las cascarillas y en el tejido foliar. A nivel del suelo se tienen indicadores que son empleados como referencia respecto a la presencia de niveles tóxicos de cadmio, como es el caso de la macrofauna del suelo en especial las lombrices que son sensibles al envenenamiento por cadmio (BROWN y DOMÍNGUEZ, 2010).

Bajo este contexto se planteó el presente trabajo de investigación, definiendo los siguientes objetivos:

Objetivo general:

- Identificar la situación de la presencia de cadmio en el cultivo de cacao orgánico en algunas parcelas de los agricultores de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo de Tingo María

Objetivos específicos:

- Determinar las propiedades físico – químicas de los suelos de cacao.
- Evaluar los niveles de cadmio en los suelos del cultivo de cacao
- Evaluar los niveles de cadmio a nivel foliar en el cultivo de cacao
- Evaluar los niveles de cadmio en las almendras y cascarilla de cacao
- Evaluar algunos indicadores biológicos respecto a la presencia de cadmio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Del cacao

Los aztecas y mayas cultivaban el cacao mucho antes del descubrimiento de América y lo consideraban de origen divino. El nombre del género es *Theobroma* que significa "alimento de los dioses". Comprende alrededor de unas 25 especies, pero sólo una, (*Theobroma cacao* L.) se cultiva comercialmente (LEÓN, 1987).

Es cultivado por sus semillas que constituyen la materia prima de diversas industrias. Se obtienen productos semi - elaborados como pasta de cacao, cacao en polvo y manteca de cacao, también productos elaborados destinados al consumo directo como son chocolates en tabletas o en polvo y confituras de chocolate. Los subproductos como la cascarilla se utilizan en la alimentación del ganado y en jabonería; el polvo de cacao por contener fosfatos cálcicos es reconstituyente (analéptico) y tomado con leche es un gran alimento, no obstante no debe consumirse en exceso. La manteca de cacao tiene excelentes propiedades emolientes; se usa como base para muchas pomadas por tener la propiedad de preservar la piel de sequedad, grietas y escoriaciones (LEÓN, 1987).

2.2. Metales pesados en suelos agrícolas

El término de metal pesado se refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y/o peso sea venenoso o tóxico en concentraciones incluso muy bajas (LUCHO *et al.*, 2005).

Según GARCÍA y DORRONSORO (2005), los metales pesados son los que tienen densidad igual o superior a 5 g.cm^{-3} siendo de mayor peso que los minerales formadores de roca en su forma elemental. Además, su número atómico es superior a 20, excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos. La presencia de estos elementos en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor de 0.01% (Cuadro 1).

Cuadro 1. Metales pesados en suelos y plantas terrestres.

Elementos	Suelos	Plantas terrestres
	mg/kg	mg/kg
Cadmio (Cd)	0.35	0.1-2.4
Cobalto (Co)	8.00	<1.0
Cobre (Cu)	30.00	
Cromo (Cr)	70.00	0.03-10
Hierro (Fe)	4.00	70-700
Mercurio (Hg)	0.08	<0.02
Manganeso (Mn)	1.000.00	20/700
Níquel (Ni)	50.00	
Plomo (Pb)	35.00	
Selenio (Se)	0.4.00	0.03
Zinc (Zn)	90.00	20-400
Arsénico (As)	6.00	0.2-7

Fuente: Más y Azcue (1993) citado por REYES y MARÍA (2004).

Algunos autores consideran esta definición un tanto ambigua y prefieren utilizar la definición de metales traza (WARD, 1995). Bajo esta denominación se engloban a todos los elementos presentes en concentraciones no detectables mediante técnicas de análisis clásicas, de forma que se considera elemento traza a los elementos detectables en un rango de concentración de 100 a 0.01mg/kg y se reserva el término ultratrazas a niveles comprendidos entre 0.01 mg/kg y 10 µg/kg.

Dentro de los metales pesados se distinguen dos grupos:

- **Oligoelementos.** Necesarios para el desarrollo de determinados organismos, son requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza y pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo se encuentran: arsénico (As), boro (B), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), molibdeno (Mo), manganeso (Mn), níquel (Ni), selenio (Se) y zinc (Zn).
- **Metales pesados sin función biológica conocida:** Metales cuya presencia en determinadas cantidades en los seres vivos, provocan disfunciones en sus organismos, resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de bioacumularse en los organismos vivos. Entre los principales tenemos: cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), cobre (Cu), níquel (Ni), antimonio (Sb), bismuto (Bi).

Los metales pesados han sido objeto de atención por sus características contaminantes peculiares (FACHINELLI *et al.*, 2001).

- Poseen carácter acumulativo: su concentración no disminuye con el tiempo.
- Son necesarios y beneficiosos para las plantas y otros organismos a determinados niveles, pero también son tóxicos cuando exceden unos niveles de concentración.
- Están siempre presentes en los suelos a unos niveles de concentración denominados niveles de fondo, cuyo origen no es externo, sino que proviene del material parental originario de las rocas y su transformación.
- Con frecuencia se encuentran como cationes que interactúan fuertemente con la matriz del suelo, lo que en condiciones se traduce en que incluso a altas concentraciones pueden encontrarse en forma química no dañina e inerte. Sin embargo estos metales pueden movilizarse y cambiar de forma química debido a cambios en las condiciones ambientales, cambios en el uso del suelo o por saturación de la capacidad de tamponamiento del suelo (STIGLIANI, 1993).

La composición química de la roca madre (Cuadro 2) y los procesos de meteorización condicionan, de forma natural, la concentración de diferentes metales pesados en los suelos (TILLER, 1989 y ROSS, 1994a). Los rangos presentados por (ROSS, 1994a) son muy variables en función del tipo de roca de la que se trate y, generalmente, las concentraciones son mucho mayores en rocas ígneas. Este hecho implica que los rangos de concentración natural de los metales en los suelos pueden ser amplios y están condicionados, básicamente, por el tipo de roca madre y el grado de meteorización de la misma. Estos factores dependen en gran medida de la zona de estudio, por lo

que existe una gran variabilidad espacial en la concentración de metales en los suelos.

2.3. Origen de la contaminación del suelo por metales pesados

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas y en ese momento genera la contaminación ambiental.

2.3.1. Origen natural

Los metales pesados al meteorizarse, se concentran en los suelos y estas concentraciones naturales pueden llegar a ser tóxicas, debido a que pueden ocasionar acumulación de algún metal en plantas y ocasionar efectos tóxicos para los animales que la consumen. En suelos, los más abundantes (1-1500 mg/kg) son el manganeso, cromo, zinc, níquel, y plomo (SÁNCHEZ, 2003).

2.3.2. Origen antropogénico

La concentración natural se incrementa por diversas actividades humanas, entre ellas destacan la minería, la fundición, la producción energética, la actividad industrial, la producción y uso de plaguicidas, el tratamiento y depósito/vertido de residuos, parque automotor, etc. (WEBER y KARCZEWSKA, 2004).

Cuadro 2. Concentración típica de metales pesados en las principales tipos de rocas.

Rocas	Concentración Elementos (mg/kg)									
	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sn	Zn
Rocas Ígneas										
Ultrabásicas	0.12	110-150	2000-2980	10-42	0.004	1040-1300	2000	0.1-14	0.5	50-58
Básicas	0.13-0.2	35-30	200	90-100	0.01-0.08	1500-2200	150	3-5	1-1.5	100
Granito	0.009-0.2	1	4	10-13	0.08	400-500	0.5	20-24	3-3.5	40-52
Rocas Sedimentarias										
Calcáreas	0.028-0.1	0.028-0.1	10-11	5.5-15	0.05-0.16	620-1100	7-12	5.7-7	0.5-4	20-25
Areniscas	0.05	0.05	35	30	0.03-0.29	4-60	2-9	8-10	0.5	16-30
Metamórficas	0.2	0.2	90-100	39-50	0.18-0.5	850	68-70	20-23	4-6	100-120

Fuente: ROSS (1994a).

En los suelos agrícolas, la entrada de metales se produce, mayoritariamente, desde los fertilizantes, plaguicidas, estiércol, y, también, desde la atmosfera (ALLOWAY y JACKSON, 1991). Por ejemplo, los fertilizantes fosforados aportan una cantidad de Cd, y para el control de plagas se han utilizado sales de Zn, y arsenatos de Cu y Pb (TILLER, 1989). También el agua de riego y el uso, cada vez más extendido, de enmiendas orgánicas y biosólidos, entre los que destacan los lodos de depuradora y composts realizados a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) o de residuos industriales, son importantes fuentes de metales en los suelos agrícolas (NICHOLSON *et. al.*, 2003). En Europa, estas actividades han incrementado desde hace varias décadas. Este hecho hace que, hoy en día, sea muy difícil identificar una zona en la que se tenga la certeza de que nunca ha habido entrada de metales pesados de origen antrópico (KABATA-PENDIAS, 1995).

a. Origen por medio de residuos orgánicos

La utilización de residuos orgánicos como enmiendas a suelos hortícolas, produce incremento, entre otras características, del contenido de materia orgánica, un factor positivo en la agregación del suelo, y un mayor aporte de micronutrientes, que puede inducir a un aumento de la producción agrícola (ZHELJAZKOV y WARMAN, 2003). Sin embargo, el contenido de contaminantes orgánicos y metales pesado, que limita la cantidad que se puede adicionar sin suponer un riesgo para la salud humana, quizás mermen los efectos beneficiosos de las enmiendas orgánicas (SANCHEZ-MONEDERO *et al.*, 2004). Por ello, para evitar problemas derivados de un

exceso de metales se debe regular los niveles máximos permitidos con los residuos orgánicos para uso agrícola.

b. Origen por medio del agua de riego y productos químicos

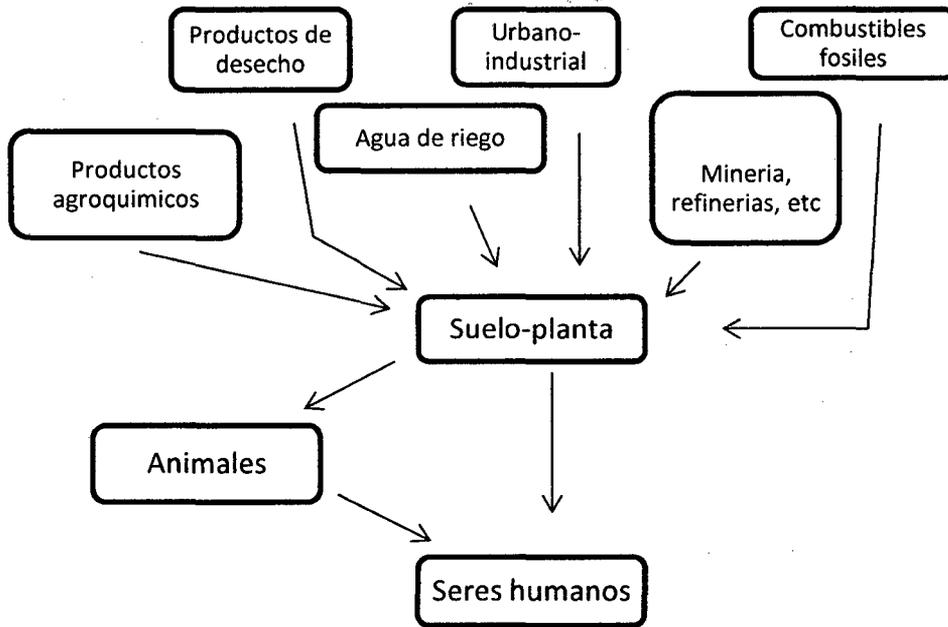
La utilización de fertilizantes, principalmente sintéticos, representan un potencial de riesgo de contaminación de metales pesados a los acuíferos subterráneos cuando su aplicación se realiza en ausencia de las consideraciones agronómicas que contemplan el balance de nutrientes entre el consumo de los cultivos y el aportado por el suelo (Reynoso *et al.*, 2004 citado por CUENCA, 2012). De esta manera se contaminan las aguas subterráneas que en su mayoría son utilizados para el riego de cultivos.

La aplicación de plaguicidas es otro problema de contaminación; se ha establecido que sólo el 0.1% de la cantidad de plaguicidas aplicado llega a la plaga, mientras que el restante circula por el ambiente, contaminando posiblemente el suelo, agua y la biota; por lo tanto, se hace necesario caracterizar el destino final y la toxicidad no prevista de estos plaguicidas para evaluar con certeza el riesgo asociado a su uso (CARVALHO *et al.*, 1998).

c. Origen por medio de las actividades de minerías y refinerías

La industria minera es una de las actividades económicas de mayor tradición contaminante, la cual es mayoritariamente metálica y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata, cadmio y plomo. Esta actividad tiene un alto impacto ambiental, ya que afecta desde el subsuelo hasta la atmosfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua. Debido al procesamiento de los recursos minerales, se han generado grandes cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que han ocasionado una gran cantidad de sitios contaminados a lo largo de todo el país (MONGE *et al.*, 2008).

Las posibles fuentes de metales al sistema agrícola, tanto al suelo como a los cultivos se presentan en la Figura 1. También se refleja la transferencia de los metales desde el sistema suelo-planta a los seres humanos. Por tanto, se puede observar que la contaminación por metales pesados de los suelos puede afectar de manera directa a la salud humana (NRIAGU, 1990). Los metales pueden llegar a los seres humanos bien por ingestión directa o a través de la ingestión de plantas y/o animales, aunque también a través del aire y aguas superficiales (OLIVER, 1997). Por otro lado, de manera indirecta, la contaminación por metales pesados tiene efectos sobre el bienestar del ser humano al interferir en la "salud" ambiental (NRIAGU, 1990).



Fuente: WEBER y KARCZEWSKA (2004).

Figura 1. Fuentes y factores de contaminación en el sistema suelo-planta.

1.1. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados en los suelos

Los factores que afectan la disponibilidad de los metales están relacionados con la meteorización química de la roca madre (ROSS, 1994b). La solubilidad de los elementos pesados puede estar afectada por las características presentadas por estos, pues existe una interacción entre ellos.

1.1.1. El pH

El pH del suelo es el principal factor que condiciona los procesos de adsorción en el suelo y la actividad de los metales (HOUBA *et al.*, 1996). La forma en que el pH afecta a la adsorción de los metales en el suelo ha sido explicada por diversos mecanismos. Algunos de estos mecanismos son la precipitación, la hidrólisis metálica seguida de la adsorción de las especies de

metales y la competencia de los cationes metálicos por los sitios de intercambio (BASTA y TABATABAI, 1992) o la ionización de grupos superficiales, el desplazamiento del equilibrio en las reacciones de complejación superficiales, la competencia con H_3O^+ y Al^{3+} por los sitios negativos y los cambios en la especiación metálica (MSAKY y CALVET, 1990). Además, generalmente, los metales quedan retenidos en el suelo a pH básicos, mientras que a pH ácidos los metales están más solubles siendo, por lo tanto, mayor su disponibilidad para las plantas (ROSS, 1994b). No obstante, existen excepciones, pudiendo estar algunos metales, como el arsénico, selenio y cromo, más biodisponibles a pH básicos (MCLEAN y BLEDSOE, 1992).

a. Intercambio catiónico

Todos los suelos presentan cargas negativas en la superficie de sus constituyentes (EVANS, 1989). De acuerdo con el principio del electro-neutralidad, la carga negativa en la superficie de los coloides son neutralizadas por una cantidad equivalente de cationes en la solución suelo, los que pueden quedar adsorbidos (SILVA, 2004).

Esta adsorción de cationes por el suelo se denomina "adsorción no específica", que se caracteriza porque el ion es atraído electrostáticamente por las superficies cargadas de la fracción coloidal del suelo, sin que haya una dependencia de configuración electrónica con el grupo funcional de la superficie del suelo, formando complejos llamados de esfera externa (SPOSITO, 1989).

La cantidad de iones que pueden ser adsorbidos de forma intercambiable en el suelo se llama capacidad de intercambio catiónico o CIC. En la mayoría de casos existe selectividad o preferencia de un catión por otro, por lo tanto, es un proceso competitivo y reversible (SILVA, 2004).

En general, la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de los metales en la solución 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).

b. Adsorción específica

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 (ALLOWAY, 1995). La adsorción específica no es fácilmente reversible.

La adsorción específica es un fenómeno de alta afinidad, involucrando mecanismos de intercambio entre el metal y el ligando de la superficie de los coloides por medio de enlaces covalentes o iónicos. Este término ha sido utilizado para explicar la razón por la cual algunos suelos adsorben determinados cationes en concentraciones superiores a su capacidad

de intercambio catiónico (ALLOWAY, 1995). Los metales pesados que se encuentran como aniones, arsénico (As), selenio (Se), molibdeno (Mo), también pueden presentar adsorción específica en las superficies de los óxidos e hidróxidos hidratados.

La adsorción específica es altamente dependiente del pH e involucra a los coloides orgánicos e inorgánicos (óxidos hidratados de Al, Fe y Mn y la materia orgánica), y ocurre que la concentración de los metales sea baja (SILVEIRA *et al.*, 2003).

c. Precipitación

Las reacciones de precipitación y dilución dependen del producto de solubilidad (K_{ps}) del sólido en agua. Los iones metálicos en la solución suelo pueden precipitar con un agente químico, generalmente aniones como fosfato, carbonato o sulfato (RIEUWERTS *et al.*, 1998).

También pueden precipitar como hidróxidos al reaccionar con los iones oxidrilos presentes en la solución (BASTA y TABATABAI, 1992). La precipitación/disolución son procesos que, además se ven influenciados por el pH y el potencial redox del suelo (RIEUWERTS *et al.*, 1998). 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). La

precipitación es improbable que suceda en condiciones ácidas, excepto cuando hay grandes cantidades de cationes y aniones. BOEKHOLD *et al.*, (1993), sostienen que la precipitación de Cd es poco probable que ocurra en suelos neutros y ácidos, excepto cuando hay altas concentraciones de carbonatos, sulfatos o fosfatos.

d. Complejación y quelación

La complejación de metales se involucra a un ion metálico en solución que está siendo rodeado por uno o más ligandos orgánicos e inorgánicos (RIEUWERTS *et al.*, 1998). La quelación ocurre cuando un ligando polidentado, generalmente una molécula orgánica grande, ocupa dos o más sitios de coordinación alrededor de un ion metálico central. (BOHN *et al.*, 1979). 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 fúlvica solubles (EVANS, 1989). Los hidróxidos y el ion cloruro son considerados como los ligandos inorgánicos más importantes (SPOSITO, 1989).

1.1.2. Materia orgánica

Los constituyentes de la materia orgánica le proporcionan sitios para la adsorción de metales (grupos funcionales con comportamiento ácido, tales como carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos-OH y grupos aminos), pudiendo ser la principal fuente de capacidad de intercambio catiónico en las capas superficiales del suelo (MCLEAN y BLEDSOE, 1992). Incluso en suelos

agrícolas, generalmente con bajas concentraciones de materia orgánica la contribución a la capacidad de intercambio catiónico es significativo, aunque varía en función del tipo de suelo (KABATA-PENDIAS, 2004). Además, la materia orgánica puede retener a los metales tanto por su capacidad de intercambio catiónico como por su capacidad quelante (Adriano, 2001 citado por CUENCA, 2012).

La materia orgánica puede adsorber fuertemente a algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible para las plantas. Por eso algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu. El Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables. La complejación por la materia orgánica del suelo es una de los procesos que gobiernan la solubilidad, y la bioasimilación de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una de causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo (García y Dorronsoro, 2011 citado por CUENCA, 2012).

1.1.3. Calcio

La presencia de altas concentraciones de calcio en los suelos puede reducir la absorción de metales pesados como el cadmio y el cobre por

parte de plantas, debido a que existe una competencia iónica entre ellos; de la misma manera, las altas concentraciones de estos metales pesados puede reducir la absorción de calcio y bajar la concentración de este elemento a nivel de raíces hojas y frutos de las plantas (ÓSTERAS y GREGER, 2006).

En la mayoría de suelos donde encontramos presencia de calcio, no únicamente lo encontramos como calcio libre, sino que puede estar como carbonato y fosfato de calcio; en esta situación el cadmio puede ser controlado por la alcalinización del suelo y precipitar al metal pesado. Además el efecto competitivo del calcio y las consecuencias fisiológicas y químicas de un incremento del pH del suelo disminuyen la absorción de cadmio por las raíces de cultivo (CONTRERAS *et al.*, 2002).

1.1.4. Composición granulométrica o clase textural de los suelos

La composición granulométrica de los suelos tiene una gran importancia en la retención de los metales debido, fundamentalmente a la capacidad de adsorción de las arcillas. Esto hace que una mayor o menor concentración de arcilla condicione, en gran medida, el contenido de metales en los suelos pudiendo incluso relacionarse los contenidos medios de metales pesados agrupándolos en función de las texturas de los suelos analizados (BAK *et al.*, 1997 y ASSADIAN *et al.*, 1998).

1.1.5. 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 (MARTÍNEZ y MOTTO, 2000). La correlación positiva que se establece entre la concentración de cadmio y el contenido de carbonatos en los suelos carbonatados naturales, sin cultivar ni contaminar, confirma la importancia de los carbonatos en la acumulación de los metales. Esta correlación puede ser debida a la gran afinidad del cadmio por los carbonatos, debido a su adsorción al carbonato de calcio o la formación de precipitados de carbonatos de cadmio (STALIKAS *et al.*, 1999). La precipitación de carbonatos de cadmio 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, 1988). Por otro lado, el cobre y el zinc, aunque con menor fuerza que el cadmio, también son adsorbidos por los carbonatos (PAPADOPOULOS y ROWELL, 1989).

1.1.6. Óxidos de hierro y manganeso

Otros componentes importantes en la regulación de la dinámica de los metales pesados en el suelo son los óxidos de hierro y manganeso. De hecho juegan un papel importante en la adsorción del cromo, especialmente en los suelos ácidos. También pueden ser muy importantes los óxidos de hierro y manganeso en la adsorción del cobre, plomo o manganeso (Adriano, 2001 citado por CUENCA, 2012).

1.2. Absorción y traslocación de metales pesados en las plantas

Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar y acumular nutrientes, sin embargo, algunos metales y metaloides no esenciales para los vegetales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos requeridos (LASAT, 2000).

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen de (1) el movimiento de los metales desde la solución suelo a la raíz de la planta, (2) el paso de los metales por las membranas corticales de la raíz, (3) el transporte de los metales desde las células corticales al xilema desde donde la solución con metales se transporta de la raíz a los tallos, y (4) la posible movilización de los metales desde las hojas hacia los tejidos de almacenamiento usados como alimento (semillas, tubérculos y frutos) por el floema. Después de la absorción por los vegetales, los metales están disponibles para los herbívoros y humanos directamente o a través de la cadena alimentaria. Otro mecanismo de ingreso de sustancias potencialmente tóxicas a las plantas, como los metales pesados, es mediante la absorción foliar. La disponibilidad a través de las hojas de algunos elementos traza provenientes de fuentes aéreas puede tener un impacto significativo en la contaminación de las plantas y también es de particular importancia en la aplicación de fertilizantes foliares. La absorción foliar es mediada por una fase

de penetración cuticular y un mecanismo de carácter metabólico que considera la acumulación de los elementos contra un gradiente de concentración (KABATA-PENDIAS, 2000).

Los metales pesados acumulados en los tejidos vegetales de las plantas que son capaces de absorberlos y acumularlos por sobre lo establecido a lo normal para otras especies en los mismos suelos se llaman hiperacumuladoras y se encuentran principalmente en suelos que son ricos en metales por condiciones geoquímicas naturales o contaminación antropogénica. Las plantas hiperacumuladoras generalmente tienen muy poca biomasa debido a que ellas utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a las altas concentraciones de metal en sus tejidos (KABATA-PENDIAS, 2000).

Los estándares máximos de metales pesados admisibles en productos alimenticios, y en especial en las almendras de cacao, se presentan en el Cuadro 3, donde niveles pueden variar por países.

Cuadro 3. Niveles máximos de metales pesados en productos alimenticios y cacao.

Metal pesado	Unión Europea	Unión Europea	Codex
	Producto alimenticio	Almendras de cacao	Almendras de cacao
	ppm	ppm	ppm
Cadmio (Cd)	1.00	0.50	
Cobre (Cu)	350.00	50.00	30.00
Níquel (Ni)	40.00		
Plomo (Pb)	5.00	2.00	2.00
Zinc (Zn)	500.00		
Mercurio (Hg)	1.00	0.02	0.02
Cromo (Cr)	45.00		
Selenio (Se)	0.50		

Fuente: Más y Azcue (1993) citado por REYES y MARIA 2004.

1.3. Cadmio

El Cadmio (Cd) es un elemento de naturaleza química muy similar al zinc, ambos pertenecen al grupo II de la tabla periódica y es sustituto de éste en forma de impurezas en los minerales de zinc, por esto el cadmio es un subproducto de las fundiciones de zinc y otros metales. El cadmio también se presenta como sustituto del calcio en la apatita y calcita, pudiendo aumentar sus impurezas en los fertilizantes fosfatados. El hecho de que el cadmio sea un metal pesado tóxico, y el zinc sea un elemento esencial, hace que de esta asociación puedan prevenir los efectos tóxicos del cadmio mediante un tratamiento preventivo con zinc (DAS *et al.*, 1998).

Las características más remarcables del cadmio son su gran resistencia a la corrosión, su bajo punto de ebullición y su excelente conducción eléctrica.

Cuadro 4. Propiedades del Cadmio.

Símbolo químico	Cd
Forma	Blanco, metal suave
Características	Maleable, dúctil y flexible
Punto de fusión	321°C
Punto de ebullición	756°C
Número atómico	48
Peso atómico	112.41
Densidad	8.64gcm ⁻³

Fuente: GARCÍA (2002).

El cadmio se emplea fundamentalmente en la fabricación de baterías recargables de níquel-cadmio. También se utiliza como recubrimiento o tratamiento electrónico para proteger a otros metales principalmente hierro y acero. Forma aleaciones con plomo, estaño y bismuto para la fabricación de extintores, alarmas de incendios y fusibles eléctricos, ya que disminuye el punto de fusión de los metales con los que forma aleaciones. Las sales de cadmio se usan en fotografía y fabricación de pigmentos y caucho (STOEPLER, 1991).

El cadmio es un elemento no esencial y poco abundante en la corteza terrestre y bajas concentraciones puede ser toxico para todos los organismos vivos (PINTO *et al.*, 2004).

1.3.1. Cadmio en el suelo

El cadmio como metal pesado o elemento traza circula ininterrumpidamente en las estructuras biológicas (unas 40 toneladas anuales en todo el mundo); es leve si se compara con la estimación de la emisión antrópicamente inducida (Ttito, 2003 citado por CUENCA, 2012).

El cadmio se pierde del suelo o resulta inaccesible como consecuencia de la lixiviación, extracción de los cultivos, reacciona con los minerales o elementos del suelo especialmente bajo condiciones de suelo calcáreos. La absorción de cadmio, por parte del cultivo depende críticamente de diferentes factores del suelo, entre los que se podría indicar:

- La acidez del suelo: su mayor absorción se encuentra fuertemente relacionada con la acidez.
- Contenido de cadmio en el suelo: a mayor contenido de cadmio hay mayor absorción de este elemento por la planta.
- Temperatura del suelo: a mayor temperatura mayor absorción porque hay mayor velocidad de reacciones y mayor solubilidad.
- Unión de minerales del suelo: a mayor unión menor absorción de cadmio

- Contenido de humus en el suelo: a mayor humus mayor CIC por lo que habría menor cadmio en solución, lo que permite menor absorción.

1.3.2. Fuentes de contaminación del Cadmio

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 (PINTO *et al.*, 2004). Entre las acciones antropogénicas de contaminación de cadmio (Cd), caben destacar los siguientes:

- **Emisiones atmosféricas.** Se originan a partir de las minas metalúrgicas, ya que el cadmio se extrae como subproducto del plomo, zinc, cobre y otros metales, las incineradoras municipales, y las emisiones industriales procedentes de la producción de pigmentos para cristales, anticorrosivos, baterías de níquel/cadmio, e insecticidas (MCLAUGHLIN y SINGH, 1999).
- **Depósitos directos.** Otra fuente de cadmio la constituyen los lodos procedentes de aguas residuales que se utilizan en agricultura (ALLOWAY y STEINNES, 1999).
- **Los fertilizantes.** El uso de fertilizantes fosforados es la principal fuente de contaminación de cadmio en suelos agrícolas. Los que son producidos a partir de la roca fosfórica constituyen la mayor entrada agrícola de cadmio al suelo. Los fertilizantes fosfatados constituyen más del 50% de la entrada total de cadmio en los suelos (DE MEEÚS *et al.*, 2002).

- **Contaminación accidental.** Ocurre eventualmente debido a la contaminación de tierras por procesos industriales, residuos de la minería y corrosión de estructuras galvanizadas (Aguilar *et al.*, 2003 citado por CUENCA, 2012).

1.3.3. Ingreso del cadmio en la cadena trófica

La principal fuente de contaminación de cadmio en el ser humano es la ingesta de vegetales contaminados con este metal (NORVELL *et al.*, 2000). En los últimos años, la presencia de cadmio en los suelos y el riesgo de ingreso de este elemento a la cadena alimenticia, ha generado mundialmente una preocupación creciente, debido al efecto tóxico de este elemento en humanos y animales (MCLAUGHLIN y SINGH, 1999).

Químicamente, el cadmio se puede encontrar disuelto en el agua contenida en el suelo, adsorbido en superficies orgánicas e inorgánicas y en estructuras biológicas. Sin embargo, la biodisponibilidad del cadmio para la planta depende de numerosos factores físicos, químicos y biológicos que modifican su solubilidad y el estado del metal en el suelo. Uno de los principales factores es el pH del suelo, el potencial redox, la temperatura y el contenido en arcillas, materia orgánica, y agua (CHRISTENSEN y HAUNG, 1999).

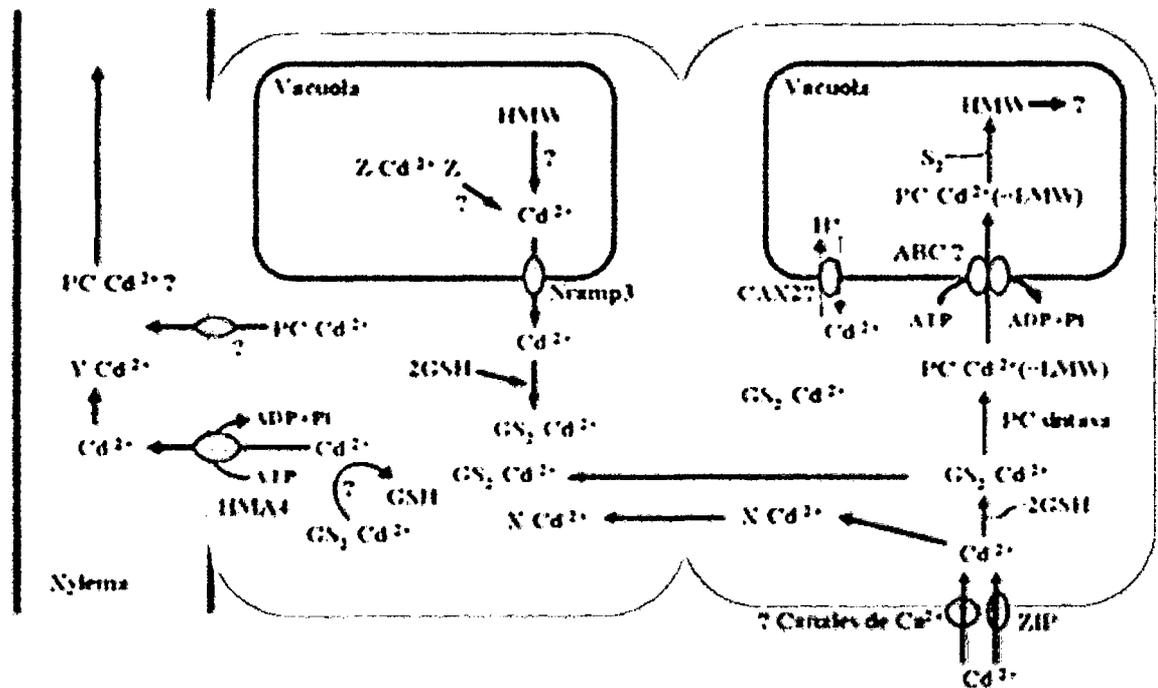
Por último es importante destacar el tipo de cultivo del que se trate, ya que no todas las plantas acumulan cadmio en igual medida (PRINCE *et al.*, 2002).

1.3.4. Ingreso transporte y acumulación del cadmio en plantas

Por ser un metal no esencial se asume que no existen mecanismos de entrada específicos para el cadmio. Entre las proteínas responsables de la entrada de cadmio a la célula cabe destacar el transportador específico del calcio LCTI (CLEMENS *et al.*, 1998), y la proteína IRTI, perteneciente a la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP) (GUERINOT, 2000). Otra familia de transportadores implicados es la Nramp, localizada en la membrana de la vacuola, por lo que probablemente tenga una función en la movilización del metal y no en el ingreso del mismo en la raíz (THOMINE *et al.*, 2000). Una vez dentro de la célula el cadmio puede coordinarse con ligandos de Azufre como glutatión (GSH) o fitoquelatinas (PCs) y ácidos orgánicos como el citrato (CLEMENS, 2006). Otras posibles moléculas responsables de la quelación del cadmio son pequeñas proteínas ricas en cisteína denominadas metalotioneinas (MTn). De esta forma, los complejos Cd-ligando pueden ser transportados al interior de la vacuola o a otras células (SHAH y NONGKYNRH, 2007).

En la planta, el cadmio se acumula preferentemente en la raíz secuestrada en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente. Se ha demostrado que el cadmio ingresa en la vacuola unido a fitoquelatinas (PCs) a través de un transportador de tipo ABC (ORTIZ *et al.*, 1995). Otro posible mecanismo de entrada del cadmio en la vacuola es mediante un cotransportador de $\text{Cd}^{2+}/\text{H}^{+}$ ubicado en la membrana en el

transporte de calcio a la vacuola, también transportan otros metales como el cadmio (PARK *et al.*, 2005). Una vez en la raíz, el cadmio puede pasar al xilema a través del apoplasto y/o a través del simplasto formando complejos (CLEMENS *et al.*, 2002). Se muestra un esquema (Figura 2) del ingreso del cadmio a través de las células de la raíz, hasta llegar al xilema.



Fuente: CLEMENS (2006).

Figura 2. Mecanismos de ingreso, secuestro y traslocación del Cadmio en las raíces.

1.3.5. Toxicidad del Cadmio en plantas

Los efectos tóxicos del cadmio sobre las plantas, han sido ampliamente estudiados (BENAVIDES *et al.*, 2005), sin embargo los mecanismos de su toxicidad aún no se conocen completamente. En general, el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales

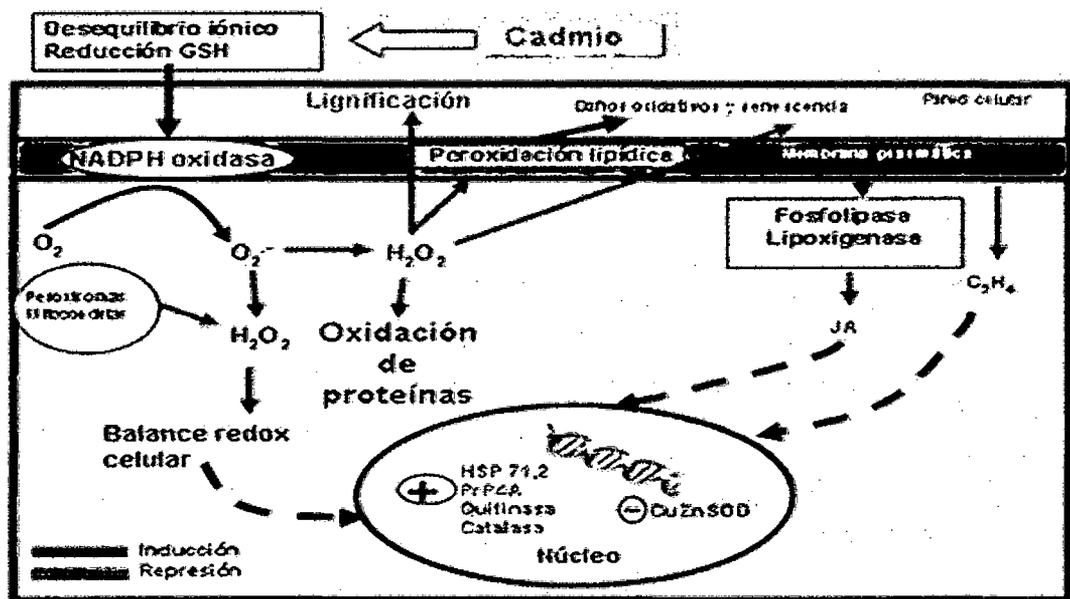
(Ca, Mg, P y K) y el agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (SINGH y TEWARI, 2003). El Cd también reduce la absorción de nitratos y el transporte de los mismos de la raíz al tallo, además de inhibir la actividad nitrato reductasa en tallos (GOUJA *et al.*, 2000). Las plantas expuestas a suelos contaminados con cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración (SANDALIO *et al.*, 2001).

Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por cadmio es la clorosis producida por una deficiencia en hierro (BENAVIDES *et al.*, 2005), fosfatos o por la reducción del transporte de Mn. El tratamiento con cadmio produce una reducción de la actividad ATPasa de la membrana plasmática (ASTOLFI *et al.*, 2005), alteraciones en la funcionalidad de la membrana plasmática (SANDALIO *et al.*, 2001) y desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto, inhibiendo la síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación de CO₂ (MAKSYMIEC *et al.*, 2007). Los cationes metálicos Cd²⁺ y Pb²⁺ no experimentan cambios redox y por lo tanto, a diferencia del Fe²⁺ o Cu²⁺, no actúan directamente en la generación de especies reactivas de oxígenos (ROS). Sin embargo, pueden actuar como prooxidantes a través de la reducción del contenido de GSH, necesario para la síntesis de PCs, disminuyendo así su disponibilidad para la defensa antioxidante (PINTO *et al.*, 2003). El estrés oxidativo producido por el cadmio se manifiesta por daños oxidativos a membranas tales como peroxidación lipídica (SANDALIO *et al.*, 2001), y también se han descrito daños oxidativos a proteínas por formación de grupos carbonilo. Las actividades de las enzimas

antioxidantes superóxido dismutasa (SOD), glutatión reductasa (GR), ascorbato peroxidasa (APX), peroxidasas (POD) y la catalasa (CAT), encargadas de la defensa celular frente a las ROS, experimentan reducciones o incremento de su actividad en función de la concentración de cadmio incluida en el medio de crecimiento, la duración del tratamiento, el tipo de tejido y la especie vegetal (SANDALIO *et al.*, 2001 y BENAVIDES *et al.*, 2005).

En los últimos años se ha incrementado el interés por el estudio de los mecanismos íntimos implicados en la producción de ROS en respuesta al Cd. Como consecuencia de ello, se ha demostrado la producción de ROS en distintos compartimentos celulares (membrana plasmática, mitocondrias, y peroxisomas) siendo la NADPH oxidasa una de las principales fuentes de ROS (GARNIER *et al.*, 2006). En los últimos años se ha prestado una atención especial al estudio de la regulación de la producción de ROS y la síntesis de antioxidantes, así como la implicación de hormonas como el ácido jasmonico y el etileno, y de moléculas como el NO. Se muestra un esquema que resume la respuesta al cadmio de la planta en la Figura 3. Según este esquema, el Cd podría inducir la NADPH oxidasa de membrana y la ROS que se formarían (O_2^- y H_2O_2) podrían intervenir en la lignificación de la pared celular que actúa como barrera de entrada del metal (SANITÁ DI TOPI y GABBRIELLI, 1999). Las ROS pueden ser eliminadas por los sistemas antioxidantes pero cuando la intensidad y duración del tratamiento superan la barrera antioxidante, se produce un exceso de ROS que se traduce en años oxidativos a membranas y proteínas. Los daños a membranas van acompañados de un incremento en la

síntesis de etileno y jasmonico (JA), que junto con el H_2O_2 van a regular la expresión de un gran número de proteínas de defensa (HSPs, quitinasa o antioxidantes, entre otras). Recientemente se ha demostrado un importante papel regulador del NO en distintos procesos de desarrollo en vegetales (DEL RIO *et al.*, 2004). El papel de esta molécula está siendo estudiado y parece ser que el cadmio reduce considerablemente la acumulación de NO en tratamientos largos, si bien no se conocen los mecanismos implicados en este proceso (RODRÍGUEZ-SERRANO *et al.*, 2006).



Fuente: SANITÁ DI TOPI y GABBRIELLI (1999).

Figura 3. Esquema de la respuesta celular al Cadmio.

1.3.6. Estrategias de tolerancia al cadmio

Las plantas han desarrollado distintas estrategias para evitar la toxicidad de metales pesados. En general, la tolerancia a metales viene determinada por la reducción del transporte del mismo al interior de la célula

y/o una mayor capacidad para secuestrar estos metales. La raíz constituye una de las principales barrera de defensa mediante la inmovilización del cadmio por pectinas de la pared celular. Los carbohidratos extracelulares (mucilago y calosa) de la raíz también pueden intervenir en la inmovilización del metal (BENAVIDES *et al.*, 2005).

La acumulación del metal en los tricomas de la superficie foliar también es un mecanismo de inmovilización y defensa celular (SALT *et al.*, 1995). Otro mecanismo consiste en la reducción del transporte o aumento de la extrusión del cadmio por transportadores de cationes de la membrana plasmática (THOMINE *et al.*, 2000). Una vez dentro de la célula, el cadmio u otros metales, pueden ser secuestrados por ácidos orgánicos, aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneinas, y posteriormente compartimentalizados en la vacuola para prevenir su toxicidad. Las fitoquelatinas constituyen uno de los principales mecanismos de defensa frente a metales pesados. Su síntesis tiene lugar a partir del glutatión y se induce en presencia de metales pesados (CLEMENS, 2006).

Plantas que sobreexpresan la enzima fitoquelatina sintasa muestran una mayor tolerancia frente al cadmio (POMPONI *et al.*, 2006). Otras posibles moléculas responsables de la acumulación del cadmio son las metalotioneinas (MTs), pequeñas proteínas ricas en cisteína, si bien en las plantas no son las principales responsables de la detoxificación del cadmio como ocurre en células animales (HAMER, 1986).

1.4. Calidad del suelo

El comité de la sociedad de la ciencia del suelo americana define la calidad del suelo (CS) como “la capacidad funcional de un tipo específico de suelo, para sustentar la productividad animal y vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire y sostener el asentamiento y salud humana, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo” (KARLEN *et al.*, 1997). La calidad del suelo incluye los conceptos de capacidad productiva del suelo y la protección ambiental. Las funciones específicas representadas por la calidad del suelo (BREJEDA y MOORMAN, 2001) incluyen:

- Captar, mantener y liberar nutrientes y otros compuestos químicos
- Captar, mantener y liberar agua a las plantas y recargar las napas subterráneas.
- Mantener un hábitat edáfico adecuado para la actividad biológica del suelo.

La Calidad del suelo (CS) es dinámica y puede cambiar en el corto plazo de acuerdo al uso y a las prácticas de manejo; para conservarla es necesario implementar prácticas sostenibles en el tiempo (NRCS, 2004). La mantención o mejora de la CS puede generar beneficios económicos en forma de aumentos en la productividad, mayor eficiencia en el uso de nutrientes y pesticidas, mejor calidad del aire y del agua, reducción de los gases de efecto de invernadero (BREJEDA y MOORMAN, 2001).

1.4.1. Evaluación de la calidad del suelo

La evaluación de la calidad permite mejorar la respuesta de los recursos, como son: pérdida de suelo por erosión, depósitos de sedimento por viento o inundación, reducción de la infiltración e incrementos de la lluvia, endurecimiento de la capa superficial, pérdida de nutrientes, transporte de pesticidas, cambios en el pH, aumento de la disponibilidad de los metales pesados, pérdida de la materia orgánica, reducción de la actividad biológica, infestación de organismos patógenos y reducción de la calidad del agua (NRCS, 2004).

1.4.2. Indicadores de calidad del suelo

El suelo a diferencia del agua y el aire no tiene estándares de calidad definidos debido a su variabilidad, por lo que es casi imposible establecer una simple medida física, química o biológica que la refleje adecuadamente. Se debe considerar, además, otros factores que afectan su funcionamiento, lo que dificulta definir, medir y regular la calidad de este recurso (BANDICK y DICK, 1999). Los indicadores dependen del ecosistema considerado, debiendo determinarse características que sirvan como indicadores de su sostenibilidad.

Los indicadores de calidad del suelo permiten analizar la situación actual e identificar puntos críticos con respecto a la sostenibilidad del suelo como medio productivo o bien como recurso natural importante para la calidad de la vida y mantención de la biodiversidad; permiten analizar los posibles

impactos antes de una intervención y ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible (Hunnemeyer *et al.*, 1997 citado por BAUTISTA *et al.*, 2004).

1.4.3. Indicadores biológicos del suelo

Las propiedades biológicas y bioquímicas (respiración edáfica, biomasa microbiana, actividades enzimáticas, microorganismos y otros) son más sensibles y son valiosas en la interpretación de la dinámica de la materia orgánica y en los procesos de transformación de los residuos orgánicos; además, dan rápida respuesta a los cambios en el manejo del suelo, son sensibles al estrés ambiental y fáciles de medir (BANDICK y DICK, 1999).

1.4.4. Indicadores para evaluar la calidad del suelo en relación a los metales pesados

La biomasa de los microorganismos del suelo representa menos del 5% de su materia orgánica, sin embargo, desempeña por lo menos tres funciones críticas en el suelo y en el medio ambiente (DALAL. C, 1998); es una fuente lábil de carbono, nitrógeno y fósforo, constituye una reserva de estos elementos, y es un agente de transformaciones de nutrientes y de degradación de pesticidas.

Para fines comparativos la biomasa microbiana e índices derivados de ella se han usado exitosamente para medir cambios inducidos por las prácticas de manejo, cero – labranza, rotación de cultivos y otras prácticas

culturales, ciclo de nutrientes, deposición de lodo o aplicación de herbicidas e insecticidas.

El incremento actual de la demanda para monitorear la calidad del suelo y cuidar el ambiente ha hecho que se modernicen técnicas para medir biomasa u otros índices equivalentes.

La biomasa tiene un rápido "turnover", lo que determina que experimente cambios muy rápidos frente a modificaciones del ambiente, aparición de contaminantes, pesticidas u otros, modificando sus valores antes de que estos cambios se manifiesten en las propiedades químicas o físicas del suelo.

Los parámetros medidos y que se encuentran con mayor frecuencia en la literatura son: biomasa, actividades enzimáticas como la deshidrogenasa por ejemplo, y actividad respiratoria (evolución de CO₂).

Los metales pesados cuando se encuentran en concentraciones excesivas son tóxicos para la mayoría de los organismos y frecuentemente se han reportado efectos tóxicos en los microorganismos del suelo por la presencia de metales pesados (GILLIER *et al.*, 1998).

1.4.5. Macrofauna del suelo

La macrofauna del suelo poco es considerada al momento de establecer las diferentes prácticas agrícolas; no obstante, puede ser afectada por el impacto que ocasiona la labranza y el uso de insumos químicos, condición que se refleja en la reducción o eliminación de especies y en la disminución de la biomasa de estas poblaciones; dada la susceptibilidad a ser afectadas por dichas prácticas, la macrofauna se ha establecido como un indicador de la calidad de los suelos (FEIJOO y KNAPP, 1998).

De hecho diversos autores proponen que una diversidad de taxas o algunos grupos dominantes, pueden revelar información sobre la calidad del suelo y sugieren también a los macroinvertebrados como proveedores de servicios ambientales, por ejemplo, contribuyen en el secuestro de carbono en el suelo, en la transformación de la hojarasca, aireación del suelo y formación de estructura (LAVELLE, 1996).

Los macroinvertebrados del suelo son importantes reguladores de muchos procesos del ecosistema; tienen efectos positivos en la conservación de la estructura del suelo, actúan sobre el microclima y la aireación; en el movimiento y retención de agua, en el intercambio de gaseoso y propiedades químicas y nutricionales del mismo, pueden activar o inhibir la función de los microorganismos y están involucrados en la conservación y ciclado de nutrientes (WOLTERS y EKSCHMITT, 1997). La alta sensibilidad de muchos macroinvertebrados edáficos a perturbaciones también los convierte en buenos indicadores del impacto sobre el ambiente (GUINCHARD y ROBERT, 1991).

1.4.6. Actividad microbiana del suelo

La comunidad microbiana del suelo es un componente lábil de la fracción orgánica, contiene de 1 a 3% del carbono total y hasta 5% del nitrógeno total del suelo. Las características físicas, químicas y biológicas del suelo, así como la presencia de plantas, tienen influencias sobre el número y la actividad de las poblaciones microbianas (LUNA *et al.*, 2002).

Las bacterias representan entre el 25 y 30% de la biomasa microbiana del suelo, comportándose como los organismos más numerosos del suelo (entre 10^6 y 10^7 bacterias g^{-1} de suelo), mientras que los hongos, dado su mayor tamaño y presentando menor abundancia, evidencian una biomasa más significativa (OLALDE y AGUILERA, 1998). Los hongos poseen la mayor masa microbiana alcanzan hasta un 80%.

1.5. Efectos del Cadmio en la salud humana

Los estándares de calidad pueden variar dependiendo del país, pero todos toman en consideración el contenido de elementos tóxicos (plomo, níquel, cobre, cadmio y manganeso, entre otros) en las almendras. Estos elementos se acumulan en órganos del cuerpo humano, provocando la aparición de enfermedades, y en muchos casos, la muerte. Por ejemplo, la ingestión de plomo por largo tiempo puede producir parálisis de los tobillos y muñecas, disminución de la inteligencia, deterioro de la memoria, problemas de audición y equilibrio. El cadmio es la principal causa de los bebés azules, produce daños renales e hipertensión, lesiones óseas y pulmonares. También

se le considera inductor del cáncer prostático y testicular (ENCICLOPEDIA ENCARTA, 2003).

El mayor desarrollo de la actividad industrial está trayendo consigo desequilibrios en los ecosistemas expresados mediante la contaminación de suelos, aguas y aire. El cadmio es vertido a las aguas a través de los relaves mineros y desagües de las industrias, depositándose en el barro de los ríos y lagos (BRACK y MENDIOLA, 2000).

Este elemento ingresa al organismo fundamentalmente a través de los alimentos, el agua y el cigarro y tiene un tiempo de vida media de más de 10 años en el hombre. No se encuentra distribuido uniformemente en el cuerpo humano y se almacena mayormente en hígado y riñón. Es altamente tóxico. (KOJI, 1986).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Cultivo

El trabajo de investigación se realizó en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) del clon CCN 51 bajo condiciones de cultivo orgánico en producción.

3.2. Ubicación de los campos

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en veinte (20) parcelas de agricultores de cacao orgánico pertenecientes a la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo. Los campos fueron debidamente georeferenciados los cuales fueron trabajados en el programa de ArcGIS para su respectivo mapa fisiográfico que se puede visualizar en la Figura 14 del anexo.

Cuadro 5. Georeferenciación de las parcelas evaluadas.

Código	Lugar	Coordenadas	Altitud
CD1	Afilador	0392163 E 8966362N	688m
CD2	Afilador	0391662 E 8968301 N	722m
CD3	Castillo grande	0389136 E 8975819 N	645m
CD4	Afilador	0392655 E 8968550 N	1024m
CD5	Tulumayo	0383553 E 8991922 N	596m

CD6	Tulumayo	0384042 E 8990266 N	609m
CD7	Tulumayo	0382677 E 8993446 N	596m
CD8	Tulumayo	0383220 E 8996056 N	598m
CD9	Trampolín	0396057 E 8981416 N	664m
CD10	Trampolín	0395144 E 8982487 N	702m
CD11	Trampolín	0395206 E 8982594 N	657m
CD12	Trampolín	0395635 E 8982993 N	653m
CD13	Bella	0385023 E 8970034 N	695m
CD14	Bella	0387809 E 8968823 N	656m
CD15	Bella	0384353 E 8965832 N	860m
CD16	Bella	0386749 E 8969086 N	691m
CD17	Naranjillo	0391198 E 8974144 N	698m
CD18	Naranjillo	0391032 E 8973702 N	687m
CD19	Naranjillo	0390222 E 8978246 N	652m
CD20	Naranjillo	0391092 E 8973776 N	695m

Fuente: Elaboración propia

3.3. Evaluación de campo

En cada campo se delimitaron áreas de muestreo al azar en forma de zigzag para el análisis de suelo, foliar, almendras, cascarillas y biología del suelo.

3.4. Metodología de evaluación

En cada parcela de cacao se procedió a realizar las siguientes evaluaciones:

3.4.1. Evaluación del suelo

Se realizó un reconocimiento del campo de cacao de cada agricultor. Se muestreo en forma de zigzag, de preferencia ubicada bajo la proyección de la copa del árbol de cacao, para cada parcela se procedió a obtener al menos 20 submuestras empleándose para ello un tubo muestreador. Al final se obtuvo una muestra compuesta, en la que se realizó el análisis físico-químico respectivo. Los métodos usados fueron:

Cuadro 6. Métodos usados para los análisis físico-químicos de los suelos

Característica	Método
Clase textural	Hidrómetro de Bouyoucus
pH	Potenciómetro relación 1:1 (agua – suelo)
Materia orgánica	Método de Walkley y Black
P disponible	Método de Olsen modificado
Potasio disponible	Método de Ácido Sulfúrico 6N
CIC	Método de Acetato de Amonio 1N pH 7 (Suelos con pH>5.5).
Calcio, magnesio, potasio sodio	Absorción Atómica
CIC efectiva	Desplazamiento con KCl 1N (Suelos con pH<5.5)
Aluminio más hidrogeno	Método de Yuan
Cadmio disponible	Extractante EDTA 0.05M pH7 (WETERMAN, 1990).

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Análisis de Cadmio disponible

Método: Según WETERMAN (1990).

- Pesar 5 g de suelo y adicionar a un vaso
- Luego agregar 20ml de solución Extractante (EDTA 0.05M; pH7)
- Agitar constantemente por 15 minutos
- Filtrar con papel filtro N° 40
- Leer en el EAA (lámpara de Cd 228.8 nm; celda 0.5 nm; patrones de Cadmio: 1ppm, 2ppm y 3 ppm).

3.4.3. Evaluación del follaje

En cada parcela de cacao se obtuvo 2 hojas por planta de cacao teniendo en total 40 hojas (20 plantas). Estas hojas fueron extraídas tomando como referencia su ubicación en la parte media. Este material fue llevado al laboratorio para el análisis foliar en la que a partir de la obtención del extracto por medio de digestión por vía seca se determinaron los siguientes elementos:

- Fosforo, Método de metavanadato (lectura en espectrofotómetro)
- Cationes por Espectrofotometría de Absorción Atómica

La determinación de Nitrógeno Total se realizó por el método Kjeldahl.

3.4.4. Evaluación de la almendra

En cada parcela donde se obtuvo la muestra de suelo y foliar se obtuvieron también las muestras de granos para lo cual se partieron de 20 mazorcas obteniendo los granos de cacao frescos los que fueron llevados al cajón fermentador en un saco blanco por un plazo de 6 a 7 días, luego se pesaron las muestras (1.200 kg en promedio) y fueron llevados a la era de la COOPAIN para su secado de 5 días en promedio, hasta obtener almendras a 8% de humedad en promedio. Las almendras secas fueron llevadas al laboratorio de suelos de la UNAS para su análisis, obteniéndose el extracto por vía seca. Para determinar:

- Fosforo, Método de metavanadato (lectura en espectrofotómetro)
- Cationes por Espectrofotometría de Absorción Atómica

La determinación de Nitrógeno total se realizó por el método Kjeldahl.

3.4.5. Evaluación de la cascarilla

De las almendras ya secas en la era de la COOPAIN, se obtuvieron las cascarillas, golpeando suavemente en un mortero cada almendra y descascarándolas con las manos; hasta obtener la cascarilla de almendra de cacao, las que posteriormente fueron llevadas al laboratorio de suelos de la UNAS para su análisis de cadmio.

3.4.6. Análisis de cadmio total a nivel foliar, almendra y cascarilla de almendra

Método: Vía Seca. Según Carter (1993) citado por GONZALES *et al* (2010).

- Pesar 2 gramos de muestra molida y seca a 105C° por 24 horas
- Colocar en un crisol el cual ha sido identificado previamente
- Colocar el crisol dentro de la mufla. Seleccionar la temperatura de 450°C en la mufla por 8 horas. Apagar el sistema y dejar que enfríe antes de remover el crisol.
- Humedecer la muestra calcinada, con agua destilada.
- Agregar lentamente 2 ml de HCl concentrado
- Evaporar lentamente el contenido hasta sequedad

- Agregar 2 ml de agua destilada y 2 ml de HCl concentrado
- Calentar suavemente a fin de permitir la disolución
- Transferir el contenido del crisol, ayudándose con agua caliente y por filtración, a una fiola de 50 ml.
- Leer en el EAA

3.4.7. De la macrofauna del suelo

De acuerdo a la metodología recomendada por la Tropical Soil Biology and Fertility (ANDERSON e INGRAM, 1993) se obtuvieron monolitos de suelo con las siguientes dimensiones: 25x25x20cm. Las muestras obtenidas fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos de la UNAS para la evaluación respectiva hasta el nivel de orden de los organismos encontrados.

3.4.8. De la actividad respiratoria del suelo

Según la metodología recomendada por ATLAS y BARTHA (2002) la actividad respiratoria del suelo se basa en el desprendimiento y captura del CO₂ originado en el suelo a partir de la actividad microbiana; para su determinación se realizó el siguiente procedimiento: por cada muestra se tomó 50 gramos de suelo molido el cual, previamente humedecido, fue colocado en un frasco de vidrio o plástico de boca ancha donde también se colocó un recipiente pequeño con 10 ml de NaOH 1N. Al final el frasco fue sellado herméticamente colocándose en un lugar fresco y oscuro. Al término del periodo de incubación (1 día) se abrieron los frascos y el recipiente conteniendo NaOH se vertió en un matraz al cual se añadió BaCl₂, luego se

tituló con HCl 1N. La cantidad de CO₂ emitido se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{CO}_2 = \frac{(10 - g) \times \text{Na} \times 22}{\text{P} \times \text{n}^\circ \text{ días}}$$

Dónde:

- CO₂ = Cantidad de CO₂ capturado
- g = Gasto de ácido (ml)
- Na = Normalidad del ácido
- P = Peso de la muestra del suelo
- n° días= Número de días de incubación de la muestra

3.4.9. De la evaluación estadística de datos

Los datos obtenidos a partir del análisis de suelos, foliar, almendra y cascarilla fueron procesados y analizados por medio del análisis de correlación con el uso del Programa SPSS 15.

3.5. Parámetros a evaluar

3.5.1. Del suelo

- Caracterización físico - química del suelo.
- Evaluación del nivel de cadmio en el suelo.

3.5.2. Del follaje

- Caracterización nutricional de la hoja del cacao.
- Análisis de la presencia del cadmio a nivel foliar.

3.5.3. De la almendra

- Caracterización nutricional de la almendra del cacao.
- Análisis de la presencia del cadmio a nivel de almendra seca

3.5.4. De la cascarilla

- Análisis de la presencia del cadmio a nivel de la cascarilla

3.5.5. De la macrofauna del suelo

- Densidad de la macrofauna en el suelo.
- Caracterización taxonómica a nivel de orden de la macrofauna del suelo.
- Comparación de medias mediante la prueba de Tukey

3.5.6. De la actividad respiratoria del suelo

- Cantidad de CO₂ liberado/g suelo.
- Comparación de medias mediante la prueba de Tukey

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Contenido de nutrientes en los suelos

En el Cuadro 7 se presentan los resultados de los análisis de suelo de los diferentes lugares los cuales muestran el contenido de nutrientes, clase textural, la reacción del suelo y el contenido de cadmio en los suelos de las diferentes zonas en donde se muestreo.

De acuerdo con los resultados de los análisis de suelo realizados (Cuadro 7) podemos mencionar de las características físico - químicas de los suelos que, para el caso de la clase textural se encontró que de las 20 parcelas evaluadas 12 parcelas presentan la clase textural franca, mientras que en las restantes se presentan las texturas franco arenoso, franco arcilloso, franco limoso y franco arcilloso arenoso.

Para el caso del pH se encontró valores máximos de 7.62, 7.61, 7.48 y 7.34 (ligeramente alcalinos), correspondientes a las parcelas CD11, CD13, CD10 y CD19 respectivamente; mientras que los valores mínimos fueron de 4.11 y 4.67 (extremadamente ácidos), correspondientes a las parcelas CD15 y CD2 respectivamente. Se encontró una media de 5.89 y una variación de 1.09.

Cuadro 7. Resultados de los análisis de suelos de las parcelas evaluadas en la COOPAIN.

Cod.	Clase textural	pH	M.O.	N	Cd	P	K ₂ O	CIC	Cmol(+)/kg					%
		1:1	%	%	ppm	ppm	kg/ha		Ca	Mg	K	Al	H	Sat. Al
CD 1 – Afilador	Franco	5.65	2.95	0.13	1.82	38.40	185.59	22.16	19.31	2.53	0.18	0.00	0.00	0.00
CD 2 – Afilador	Franco	4.67	2.63	0.12	0.55	6.66	424.21	25.65	22.04	2.38	0.00	1.08	0.14	4.21
CD 3 - Castillo Grande	Franco Limoso	5.06	2.30	0.10	0.43	7.72	147.15	35.49	32.71	2.35	0.00	0.40	0.04	1.11
CD 4 – Afilador	Franco Arenoso	5.15	3.94	0.18	0.39	5.44	405.65	52.80	44.58	7.93	0.00	0.27	0.01	0.52
CD 5 – Tulumayo	Franco	5.60	1.64	0.07	0.42	24.29	197.52	13.02	11.32	1.43	0.14	0.00	0.00	0.00
CD 6 – Tulumayo	Franco Limoso	6.32	1.97	0.09	0.51	20.69	164.38	17.04	14.84	1.42	0.67	0.00	0.00	0.00
CD 7 – Tulumayo	Franco	6.98	3.28	0.15	0.59	17.89	230.66	33.83	32.29	1.35	0.11	0.00	0.00	0.00
CD 8 – Tulumayo	Franco Limoso	5.19	2.30	0.10	0.58	14.29	298.27	22.36	17.89	4.18	0.00	0.18	0.11	0.80
CD 9 – Trampolín	Franco Arc. Aren.	6.81	3.61	0.16	0.70	11.22	267.78	28.83	25.44	1.83	0.64	0.00	0.00	0.00
CD 10 – Trampolín	Franco	7.48	3.58	0.16	1.63	42.96	125.94	14.03	11.84	2.18	0.00	0.11	0.11	0.77
CD 11 – Trampolín	Franco	7.62	2.96	0.13	0.62	37.88	205.47	21.43	20.73	0.70	0.00	0.27	0.02	1.24
CD 12 - Trampolín	Franco	6.26	1.31	0.06	0.62	7.72	116.66	22.60	17.46	4.90	0.10	0.00	0.00	0.00
CD 13 Bella	Franco	7.61	1.64	0.07	0.35	11.57	141.84	22.40	20.95	1.45	0.00	0.22	0.14	0.96
CD 14 Bella	Franco	4.73	1.31	0.06	0.37	12.45	287.66	9.60	6.76	2.55	0.00	0.27	0.01	2.85
CD 15 Bella	Franco	4.11	3.61	0.16	0.36	4.91	57.00	13.57	9.22	2.27	0.00	2.01	0.07	14.83
CD 16 Bella	Franco	5.63	5.58	0.25	0.45	11.40	167.03	11.29	7.22	3.92	0.08	0.00	0.00	0.00
CD 17 Naranjillo	Franco	5.16	4.60	0.21	1.03	81.10	281.04	29.18	25.48	3.42	0.00	0.27	0.02	0.92
CD 18 Naranjillo	Franco	4.86	4.27	0.19	0.60	90.75	306.22	21.67	20.13	1.18	0.00	0.14	0.22	0.66
CD 19 Naranjillo	Franco Limoso	7.34	1.97	0.09	0.58	10.17	271.76	42.44	39.75	1.80	0.40	0.00	0.00	0.00
CD 20 Naranjillo	Franco Arenoso	5.57	3.61	0.16	0.61	85.48	107.38	10.07	9.06	0.80	0.13	0.00	0.00	0.00
Promedio		5.89	2.95	0.13	0.66	27.15	219.46	23.47	20.45	2.53	0.12	0.26	0.04	1.44
DE		1.09	1.17	0.05	0.40	27.66	97.63	11.26	10.57	1.70	0.21	0.48	0.06	3.33
Ref (*)	Fco, Fco aren, Fco arcill	>5.6	>2	>0.2	3.00	>7	>300	>7	6.6 - 11.3	>2.5	11-18			<30

*: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, COMITE MIXTO OMS - FAO (1992).

DE: Desviación Estándar

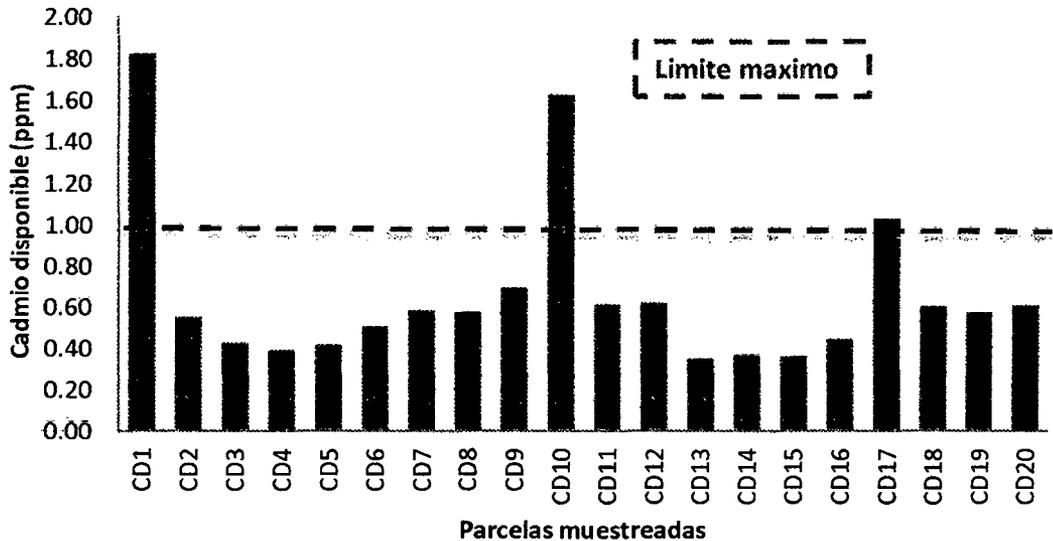
En la Materia orgánica encontramos valores máximos de 5.85%, 4.60% y 4.27% correspondientes a las parcelas CD16 (Bella), CD17 y CD18 (Naranjillo) respectivamente; mientras que los valores mínimos fueron de 1.31% correspondientes a las parcelas CD12 (Trampolín) y CD14 (Bella); y 1.64% de la parcela CD5 (Tulumayo). Se encontró una media de 2.95% y una variación de 1.17%.

Tomando los valores indicados de referencia se puede mencionar en general, que los suelos de los agricultores presentan condiciones físico químicas adecuadas para el cultivo de cacao. Sólo en el caso del contenido de K_2O (kg/ha) se puede mencionar que en algunas parcelas presentan niveles por debajo del valor recomendado (300 kg/ha) lo cual puede influir en el contenido de este elemento a nivel foliar.

Asimismo, los valores de acidez cambiante son bajos lo cual se correlaciona con un porcentaje de saturación de aluminio bajo. Una posible explicación puede ser que la mayor parte de las parcelas de cacao orgánico son zonas de suelos aluviales en los que se presenta este tipo de característica a diferencia de las zonas que se encuentran en ladera por ejemplo en la zona de cultivo de café donde los niveles de acidez son mayores (HUAMANI y HUAUYA, 2010). También se tiene valores de la CIC total altos lo cual se correlaciona con un contenido de Ca y Mg alto a excepción de una parcela (CD20 Naranjillo), donde se obtiene 9.26 y 0.80 cmol (+)/kg respectivamente.

Con respecto a los niveles de fósforo en los suelos se encontró un valor promedio de 27.15 ppm y una variación de 27.66 ppm. También se obtuvieron valores muy altos en las parcelas CD17, CD18 y CD20 (Naranjillo) con 81.10, 90.75 y 85.48 ppm respectivamente. Posiblemente se deba al tipo de material parental existente en las parcelas o a la influencia de la fertilización anterior ya que en los análisis de suelos realizados en anteriores ocasiones reportaban también altas concentraciones de fósforo.

En el caso del cadmio disponible en el suelo se presenta un valor promedio de 0.66 ppm; presentando una desviación estándar de 0.40 ppm.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Concentración de Cadmio disponible en el suelo.

De acuerdo a la Figura 4 podemos visualizar que, las parcelas que están por encima de los límites máximos permisibles (0.99 ppm de Cd) son las parcelas CD1 (Afilador), CD10 (Trampolín) y CD17 (Naranjillo); mientras que las parcelas que tienen menor concentración de cadmio fueron CD13, CD14, CD15 (Bella) y CD4 (Afilador).

Para establecer un suelo contaminado en este caso por la presencia de cadmio está en función de los valores de referencia que usemos.

Según GARCÍA y DORRONSORO (2005), se establece el valor de 0.35 ppm de cadmio total como referente mientras que para el comité Mixto OMS – FAO (1992) fija como máximo valor permisible 3 ppm de cadmio total en los suelos.

REYES y MARÍA (2004) al evaluar el contenido de metales pesados en el cultivo de cacao orgánico en República Dominicana establecieron que el cadmio disponible representa el 33% del cadmio total. Teniendo en cuenta la referencia del comité mixto OMS – FAO (1992) se puede determinar como valor máximo permitido 0.99 ppm de cadmio disponible en el suelo.

Considerando este valor se puede determinar que los suelos no se considerarían contaminados por cadmio a excepción de las parcelas CD1 (Afilador), CD10 (Trampolín) y CD17(Naranjillo) con valores de 1.82, 1.63 y 1.03 ppm respectivamente.(Figura 4).

Según INFORME N° 03 -2011-APS-COOPAIN el contenido de cadmio en una parcela correspondiente a la zona de CD1 (Afilador) se determinó 1.26 mg/kg de cadmio; lo cual coincide con los resultados obtenidos en este trabajo.

Las causas posibles de estos niveles de cadmio disponible encontrados en las parcelas antes mencionadas pueden ser la contaminación de los ríos, ya que tanto las parcelas CD1 (Afilador) y CD10 (Trampolín) se encuentran ubicadas a las riberas de los ríos Huallaga y Tulumayo respectivamente lo que se puede visualizar en la Figura 14 del anexo. También puede ser el tipo de material parental, el uso de fuentes fosfatadas, doméstico (pilas), etc.

Según WALSH S.A (2010), las concentraciones de cadmio total en sedimentos más altas por temporada en el río Huallaga se registraron en la temporada seca, con valores entre 1,28 mg/kg y 2,57 mg/kg en las estaciones CH-01-CA y CH-10 (río Huallaga) respectivamente; del mismo modo. En los afluentes del río Huallaga las concentraciones se reportaron entre 0,51 mg/kg y 1,85 mg/kg en las estaciones CH-07-CA (quebrada Lluto) y CH-09-CA (río Chimao) respectivamente.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunas propiedades físico químicas del suelo.

	Arcilla	pH	CaCO ₃	M.O	P	CIC	Ca	Mg
Cd-suelo	0.104	0.221	0.36	0.207	0.373	-0.116	-0.07	-0.058

Ningún valor tuvo significancia estadística

De acuerdo al Cuadro 8, se aprecia una correlación positiva no significativa entre los valores de Cadmio en el suelo con los valores de algunas propiedades físico-químicas del suelo como Arcilla, pH, CaCO_3 , materia orgánica (M.O.) y fósforo, mientras que se presenta una correlación negativa no significativa entre el cadmio del suelo y la CIC, Ca y Mg.

BAK *et al.* (1997) y ASSADIAN *et al.* (1998) mencionan que la composición granulométrica de los suelos tiene una gran importancia en la retención de los metales debido, fundamentalmente a la capacidad de adsorción de las arcillas. Esto hace que una mayor o menor concentración de arcilla condicione, en gran medida, el contenido de metales en los suelos pudiendo incluso relacionarse los contenidos medios de metales pesados agrupándolos en función de las texturas de los suelos analizados.

ROSS (1994b) refiere que generalmente los metales quedan retenidos en el suelo a pH básicos, mientras que a pH ácidos los metales están más solubles siendo, por lo tanto, mayor su disponibilidad para las plantas.

STALIKAS *et al.* (1999) refiere que la correlación positiva que se establece entre la concentración de cadmio y el contenido de carbonatos en los suelos carbonatados naturales, sin cultivar ni contaminar, confirma la importancia de los carbonatos en la acumulación de los metales. Esta correlación puede ser debida a la gran afinidad del cadmio por los carbonatos,

debido a su adsorción al carbonato de calcio o la formación de precipitados de carbonatos de cadmio.

DE MEEÚS *et al.* (2002) refiere que el uso de fertilizantes fosforados es la principal fuente de contaminación de cadmio en suelos agrícolas. Los que son producidos a partir de la roca fosfórica constituyen la mayor entrada agrícola de cadmio al suelo. Los fertilizantes fosfatados constituyen más del 50% de la entrada total de cadmio en los suelos.

SILVEIRA *et al.* (2003) refiere que en general, la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de los metales en la solución 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.

CONTRERAS *et al.* (2002) refiere que en la mayoría de suelos donde encontramos presencia de calcio, no únicamente lo encontramos como calcio libre, sino que puede estar como carbonato y fosfato de calcio; en esta situación el cadmio puede ser controlado por la alcalinización del suelo y precipitar al metal pesado. Además el efecto competitivo del calcio y las consecuencias fisiológicas y químicas de un incremento del pH del suelo disminuyen la absorción de cadmio por las raíces de cultivo.

4.2. Contenido de nutrientes a nivel foliar

Aun cuando en los objetivos sólo fue considerado el Cd para el análisis a nivel foliar; también se evaluó el contenido de nutrientes.

Analizando los datos del Cuadro 9, en relación con los datos referidos por SNOECK (1984) y AIKOKPODION P (2010), referidos al contenido de nutrientes en hojas de cacao, se puede mencionar que a nivel foliar las parcelas de los agricultores presentan bajos valores de N, P, K, y Cu. En el caso del contenido de K foliar se asocia con la deficiencia encontrada de este elemento en los suelos analizados.

Respecto a los niveles de cadmio total en las hojas de cacao se tiene un valor promedio de 2.84 ppm presentando una desviación estándar de 2.18 ppm.

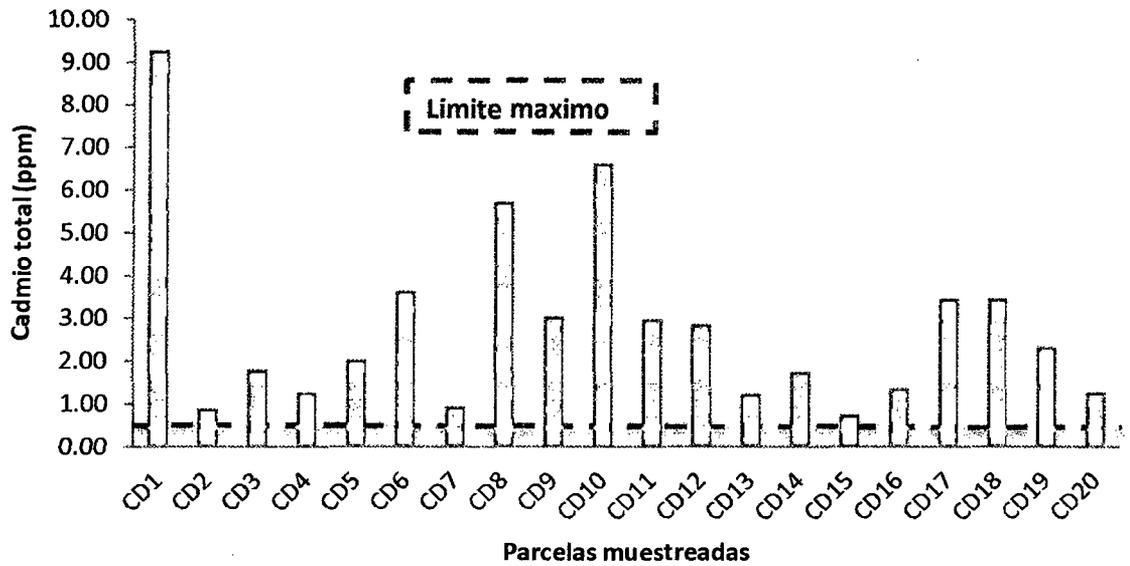
De acuerdo con la Figura 5 podemos observar que todas las parcelas evaluadas a nivel foliar superan los límites máximos permisibles, destacando las parcelas CD1 (Afilador), CD10 (Trampolín) y CD8 (Tulumayo); mientras que las parcelas con menor contenido fueron CD15 (Bella), CD2 (Afilador) y CD7 (Tulumayo).

Cuadro 9. Concentración foliar de macro y micro elemento de cacaotales de la COOPAIN.

Cod.	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)
CD1	2.26	0.16	1.13	0.99	2.91	363.73	194.67	163.93	4.38	9.27
CD2	2.20	0.11	0.90	0.81	2.25	297.75	994.14	59.06	25.27	0.89
CD3	1.52	0.14	1.25	0.92	2.82	143.73	256.98	116.57	11.42	1.80
CD4	2.57	0.11	1.20	0.62	2.66	216.76	869.54	118.46	6.15	1.26
CD5	1.43	0.13	1.60	0.68	2.97	247.09	254.81	48.90	5.87	2.03
CD6	1.89	0.12	1.03	0.76	3.65	196.69	281.35	263.92	7.57	3.64
CD7	2.11	0.15	1.53	0.63	2.73	195.76	133.02	115.45	7.03	0.95
CD8	0.98	0.16	1.50	0.78	2.52	331.91	555.82	92.20	6.43	5.72
CD9	2.75	0.18	1.10	0.88	4.15	205.08	394.77	194.82	5.00	3.05
CD10	1.97	0.17	1.10	0.94	2.70	211.05	1678.19	144.93	5.03	6.64
CD11	1.97	0.12	0.61	0.76	2.65	183.82	597.43	158.29	5.54	2.99
CD12	2.19	0.14	1.00	0.78	2.77	157.99	930.38	210.65	8.25	2.86
CD13	1.86	0.11	1.01	0.97	2.50	196.14	691.95	305.11	5.34	1.23
CD14	1.44	0.13	1.47	0.81	2.70	234.99	772.85	120.10	5.07	1.75
CD15	2.06	0.14	1.29	0.91	2.02	234.28	871.74	81.73	8.01	0.76
CD16	2.05	0.10	1.29	0.90	2.36	295.18	713.13	107.10	4.65	1.36
CD17	2.10	0.12	1.19	0.49	1.36	124.30	487.04	147.13	10.63	3.48
CD18	2.01	0.22	0.77	1.17	3.80	239.85	1394.75	192.92	6.67	3.49
CD19	1.89	0.11	1.02	0.78	3.85	249.10	184.23	145.31	9.24	2.34
CD20	2.02	0.16	1.32	0.63	1.57	204.46	332.90	70.77	4.35	1.28
promedio	1.96	0.14	1.16	0.81	2.75	226.48	629.48	142.87	7.60	2.84
DE	0.40	0.03	0.25	0.16	0.71	60.19	414.26	65.97	4.62	2.18
Ref (*)	>2	>0.2	>2	>0.45	>0.40	65 -175	50 -400	80 -170	8 - 12	0.05-0.5

*: SNOECK (1984) AIKPOKPODION, P (2010), KABATA - PENDIAS (2000).

DE: Desviación Estándar



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Concentración de Cadmio total a nivel foliar.

Según KABATA – PENDÍAS (2000), se establece los valores de 0.05 a 0.5 ppm cadmio total como referente, lo cual indica que las parcelas evaluadas presentan valores superiores a la referencia citada (Figura 5). Esto puede ser debido a actividades antropogénicas como es el caso de aplicación de fertilizantes foliares, plaguicidas, y la contaminación del aire por el parque automotor.

Según MCLAUGHLIN y SINGH (1999), la contaminación atmosférica se origina a partir de las minas metalúrgicas, ya que el cadmio se extrae como subproducto del plomo, zinc, cobre y otros metales, las incineradoras municipales, y las emisiones industriales procedentes de la producción de pigmentos para cristales, anticorrosivos, baterías de níquel/cadmio, insecticidas y parque automotor.

Cuadro 10. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunos macro y micro elementos a nivel foliar.

	P-foliar	Mg-foliar	Ca-foliar	Zn-foliar	Cu-foliar
Cd-suelo	0.371	0.154	-0.021	0.084	-0.144

Ningún valor tuvo significancia estadística

De acuerdo al Cuadro 10, se aprecia una correlación positiva no significativa entre los valores de Cadmio en el suelo con los valores de algunos macro y micro elementos a nivel foliar como P, Mg y Zn, mientras que se presenta una correlación negativa no significativa entre el cadmio del suelo y Ca y Cu foliar.

ÓSTERAS y GREGER (2006) mencionan que la presencia de altas concentraciones de calcio en los suelos puede reducir la absorción de metales pesados como el cadmio y el cobre por parte de plantas, debido a que existe una competencia iónica entre ellos; de la misma manera, las altas concentraciones de estos metales pesados puede reducir la absorción de calcio y bajar la concentración de este elemento a nivel de raíces hojas y frutos de las plantas.

4.3. Contenido de nutrientes a nivel de almendras secas sin cascarilla

Aun cuando en los objetivos sólo fue considerado el Cd para el análisis a nivel de almendras, también se evaluó el contenido de nutrientes en las mismas.

Analizando los datos del Cuadro 11 en relación con los datos referidos por AIKPOKPODION (2010), referidos al contenido de nutrientes en almendras de cacao se puede mencionar que a nivel de almendras de cacao las parcelas de los agricultores en general no presentan deficiencias a excepción de Fe y Zn, los que tienen como valores promedio 23.67 y 5.94 ppm respectivamente.

Respecto a los niveles de cadmio total en las almendras de cacao se tiene un valor promedio de 1.55 ppm presentando una desviación estándar de 0.72 ppm.

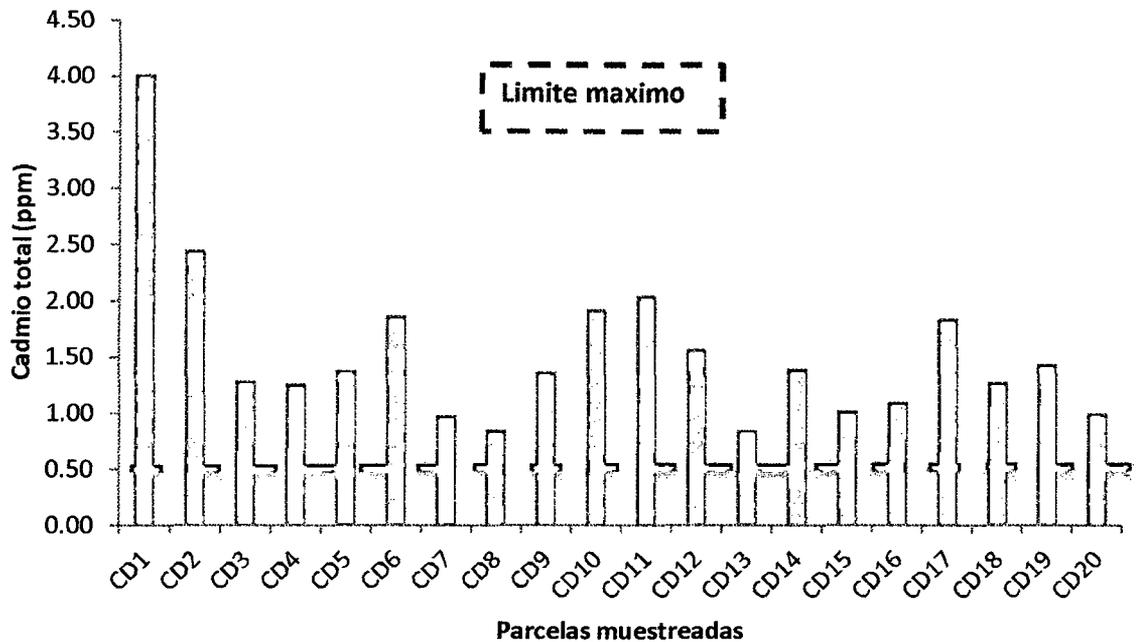
De acuerdo a la Figura 6 podemos observar que todas las parcelas evaluadas a nivel de almendras superan los límites máximos permisibles, destacando las parcelas CD1, CD2 (Afilador) y CD11 (Trampolín) con valores entre 1.87 y 4.01 ppm de cadmio total; mientras que las parcelas con menor contenido fueron CD7 (Tulumayo), CD13 (Bella) y CD8 (Tulumayo) con valores entre 0.85 y 0.98 ppm de cadmio total; debido a su procedencia, al manejo de sus suelos y a la contaminación atmosférica.

Cuadro 11. Concentración de macro y micro elementos en almendras sin cascarilla de cacaoales de la COOPAIN.

Cod.	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)
CD1	1.72	0.24	0.57	0.04	0.19	20.24	10.95	6.79	17.09	4.01
CD2	2.14	0.24	0.45	0.09	0.17	26.87	39.43	5.4	24.34	2.45
CD3	1.86	0.24	0.25	0.04	0.19	25.97	14.06	5.79	20.75	1.29
CD4	2	0.24	0.59	0.03	0.17	18.39	20.23	5.41	18.81	1.27
CD5	1.93	0.24	0.32	0.04	0.18	24.87	23.94	6.11	14.12	1.38
CD6	2.41	0.25	0.49	0.02	0.19	31.04	13.84	5.77	24.67	1.87
CD7	1.79	0.24	0.35	0.03	0.2	30.63	10.64	5.66	24.95	0.98
CD8	1.72	0.17	0.4	0.02	0.17	22.86	19.99	4.27	19.49	0.85
CD9	2	0.11	0.32	0.03	0.23	18.65	10.31	6.12	9.34	1.37
CD10	1.86	0.25	0.5	0.04	0.2	27.69	23.51	5.95	19.01	1.93
CD11	1.72	0.23	0.56	0.09	0.17	27.71	23.43	4.84	18.22	2.05
CD12	2.21	0.22	0.35	0.04	0.19	26.86	28.61	5.52	16.74	1.57
CD13	1.93	0.24	0.42	0.06	0.18	21.85	24.19	6.07	14.41	0.85
CD14	2.24	0.24	0.64	0.04	0.19	29.2	16.82	7.9	21.78	1.4
CD15	2.07	0.26	0.33	0.07	0.2	24.22	30.9	8.85	32.4	1.02
CD16	1.93	0.24	0.75	0.07	0.19	19.61	18.22	5.35	11.32	1.1
CD17	1.9	0.25	0.66	0.04	0.19	28.01	29.16	5.68	11.11	1.85
CD18	2.21	0.23	0.35	0.02	0.17	18.16	27.11	4.98	15.31	1.28
CD19	2.14	0.23	0.53	0.15	0.2	16.33	10.64	9.74	21.4	1.44
CD20	2.34	0.11	0.17	0.08	0.14	14.15	4.39	2.67	10.73	1
promedio	2	0.22	0.45	0.05	0.18	23.67	20.02	5.94	18.3	1.55
DE	0.21	0.04	0.15	0.01	0.02	4.99	8.72	1.53	5.77	0.72
Ref (*)	1.95	0.04	0.29	0.014	0.006	100	20	50		0.5

(*): AIKPOKPODION, P (2010), Más y Azcue, (1993) citado por REYES y MARÍA (2004).

DE: Desviación Estándar



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Concentración de Cadmio total en almendras sin cascarilla de cacao.

Según Más y Azcue (1993) citado por REYES y MARÍA (2004), se establece el valor 0.5 ppm cadmio total en almendras como referente.

De acuerdo con la Figura 6 se puede ver que todas las parcelas muestreadas presentan valores de Cadmio total (ppm) superiores a la referencia citada. Esto puede ser debido a las altas concentraciones de cadmio total en hojas, lo cual influenciaría en las concentraciones de cadmio total en almendras.

Según INFORME N° 03 -2011-APS-COOPAIN el contenido de cadmio a nivel de almendras en el distrito de Rupa Rupa se determinó un mínimo y máximo de 0.37- 3.67 mg/Kg, respectivamente.

Según IDIAF (2004), al evaluar la concentración de cadmio en almendras secas de cacao encontró valores de cadmio por encima de valor máximo permitido en la asociación Los Bledos (0.6 ppm).

Cuadro 12. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunos macro y micro elementos a nivel de almendra.

	P- almendra	Mg- almendra	Ca- almendra	Zn- almendra	Cu- almendra
Cd-suelo	0.013	-0.099	0.244	-0.009	-0.179

Ningún valor tuvo significancia estadística

De acuerdo al Cuadro 12, se aprecia una correlación positiva no significativa entre los valores de Cadmio en el suelo con los valores de algunos macro y micro elementos a nivel de almendra como P y Ca, mientras que se presenta una correlación negativa no significativa entre el cadmio del suelo y Mg, Zn y Cu.

4.4. Presencia de Cadmio en el suelo, a nivel foliar, almendra y cascarilla.

En el Cuadro 13 se presentan los valores de Cadmio disponible del suelo, así como también se presentan los valores de Cadmio total a nivel de hojas, almendras y cascarillas.

Cuadro 13. Contenido de Cadmio disponible en el suelo, Cadmio total en tejido foliar, almendras y cascarilla de cacao.

Lugar	Cd suelo (ppm)	Cd foliar (ppm)	Cd almendras (ppm)	Cd cascarilla (ppm)
CD1	1.82	9.27	4.01	5.97
CD2	0.55	0.89	2.45	1.73
CD3	0.43	1.80	1.29	1.23
CD4	0.39	1.26	1.27	1.71
CD5	0.42	2.03	1.38	1.65
CD6	0.51	3.64	1.87	2.48
CD7	0.59	0.95	0.98	1.65
CD8	0.58	5.72	0.85	1.75
CD9	0.70	3.05	1.37	1.87
CD10	1.63	6.64	1.93	1.08
CD11	0.62	2.99	2.05	2.92
CD12	0.62	2.86	1.57	2.84
CD13	0.35	1.23	0.85	2.13
CD14	0.37	1.75	1.40	1.04
CD15	0.36	0.76	1.02	1.55
CD16	0.45	1.36	1.10	0.85
CD17	1.03	3.48	1.85	2.07
CD18	0.60	3.49	1.28	2.73
CD19	0.58	2.34	1.44	2.37
CD20	0.61	1.28	1.00	1.10
Prom	0.66	2.84	1.55	2.04
D.E.	0.40	2.18	0.72	1.11
Ref. (*)	3.00	0.05 - 0.5	0.5	

*:COMITE MIXTO OMS - FAO (1992) GARCIA y DORRONSORO (2005), KABATA - PENDÍAS (2000)

DE: Desviación Estándar

De acuerdo con los valores del Cuadro 13 se puede apreciar que en las parcela CD1 (Afilador), CD10 (Trampolín) e incluso el CD17 (Naranjillo) los niveles de cadmio tanto en suelo, foliar, almendra y cascarillas superan los límites máximos y guardan una correlación positiva significativa entre el cadmio total en cascarilla, almendras y tejido foliar respecto al cadmio disponible del

suelo. También se aprecia que los niveles de cadmio en las cascarillas con respecto a las almendras secas, demuestran ser superiores en su contenido (ppm) en un 75% de las parcelas.

Cuadro 14. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y contenido de Cadmio total nivel foliar, almendra y cascarilla.

	Cd-foliar	Cd-almendra	Cd-cascarilla
Cd-suelo	0.857**	0.737**	0.549*

*: Significativo ($p < 0.05$)

** : Altamente significativo ($p < 0.01$).

De acuerdo al Cuadro 14, se aprecia una correlación positiva altamente significativa entre los valores de Cadmio en el suelo con los valores de Cadmio a nivel foliar y almendras secas, mientras que se presenta una correlación positiva y significativa entre el cadmio del suelo y cadmio en cascarilla.

Esto nos indica que el Cadmio tanto a nivel foliar, almendra y cascarilla aumentan su cantidad conforme este elemento aumenta su concentración en el suelo, debido posiblemente a la mayor absorción de los nutrientes y en este caso de cadmio que se encontró disponible en el suelo.

IRETSKAYA y CHIEN (1999), mencionan que los metales pesados pueden ser transferidos a las partes comestibles de los cultivos y que la capacidad de absorción es variable.

NATURLAND (2000) refiere que la planta de cacao absorbe ligeramente los metales pesados que existen por naturaleza en los suelos y los concentra en las semillas grasosas.

Según IDIAF (2004), refiere que en las cascarillas, la mayoría de asociaciones presentan valores de metales pesados (cadmio) por encima de los reportados en almendras secas.

BENAVIDES *et al.*, (2005), refieren que la absorción de cadmio a nivel de las raíces esta en competencia directa con nutrientes tales como el calcio, potasio, magnesio, fierro, cobre, manganeso y zinc por lo que pueden ser absorbidos por las mismas proteínas transportadoras.

Es posible considerar todos estos efectos debido al carácter de la bioacumulación y biomagnificación del cadmio en el suelo y en los tejidos de los órganos vivos.

4.5. De la macrofauna del suelo

En el Cuadro 15 se presentan los órdenes taxonómicos así como su densidad total encontrados en las zonas evaluadas. También se presenta las comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey.

Analizando los datos del Cuadro 15, de la densidad de la Macrofauna del suelo se obtuvo como densidad total promedio 373.53 ind/m². Se determinó que la parcela que tuvo mayor densidad de macrofauna del suelo fue CD5 con 893.33 ind/m² correspondiente a la zona de Tulumayo, debido, posiblemente a que existen condiciones favorables como rastros, materia orgánica etc. y la parcela en la que se obtuvo menor densidad de macrofauna del suelo fue CD4 (Afilador) con 69.33 ind/m² correspondiente a la zona de Alto Afilador, debido posiblemente a la presencia de cadmio.

También se encontraron los diferentes órdenes de macroinvertebrados de los cuales en el presente trabajo se encontraron 11 órdenes (Oligochaeta, Hymenóptera, Isópoda, Gastrópoda, Chilópoda, Diplópoda, Coleóptera, Orthoptera, Arácnida, Isóptera, Entomozoa).

De acuerdo a la Figura 7 se encontró en mayor abundancia los órdenes Hymenóptera con un promedio de 182.13 ind/m² (49%) seguido del orden Oligochaeta con 79.00 ind/m² (21%) e Isóptera con 29.73 ind/m² (8%), sin embargo no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las parcelas para estos órdenes. Por el contrario el orden con menor abundancia fue el Orthoptera con un promedio de 1.33 ind/m².

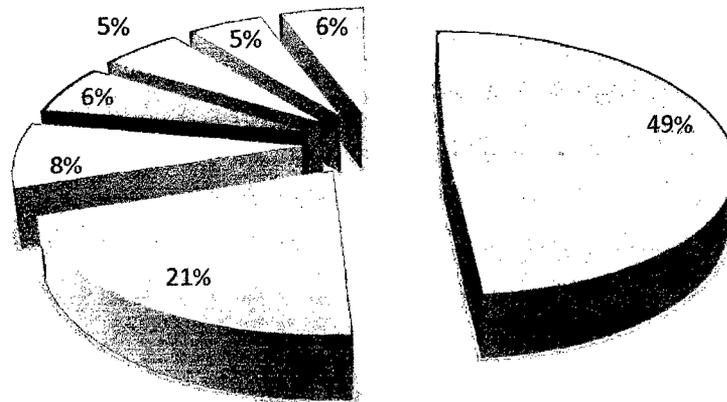
Cuadro 15. Densidad de la macrofauna del suelo.

Lugar	Oligochaeta	Himenóptera	Isópoda	Gastrópoda	Chilópoda	Diplópoda	Coleóptera	Orthoptera	Arácnica	Isóptera	Enriqueidos	Densidad total
CD1	229.33a	42.67a	0.00a	0.00a	32.00b	21.33a	53.33a	0.00b	0.00a	10.67a	0.00a	389.33a
CD2	70.67 ^a	16.00a	0.00a	0.00a	5.33b	5.33a	0.00a	0.00b	0.00a	0.00a	0.00a	97.33a
CD3	106.67a	149.33a	32.00a	0.00a	240.00a	80.00a	10.67a	0.00b	10.67a	0.00a	21.33a	650.66a
CD4	0.00a	0.00a	0.00a	0.00a	0.00b	5.33a	10.67a	0.00b	0.00a	53.33a	0.00a	69.33a
CD5	144.00a	618.67a	10.67a	0.00a	5.33b	5.33a	26.67a	0.00b	0.00a	72.00a	10.67a	893.33a
CD6	26.67 ^a	346.67a	0.00a	0.00a	64.00b	64.00a	16.00a	5.33ab	0.00a	0.00a	0.00a	522.66a
CD7	64.00a	405.33a	0.00a	0.00a	16.00b	5.33a	10.67a	0.00b	0.00a	0.00a	0.00a	501.33a
CD8	85.33 ^a	485.33a	0.00a	0.00a	5.33b	5.33a	10.67a	0.00b	0.00a	0.00a	0.00a	592.00a
CD9	74.67 ^a	405.33a	0.00a	0.00a	26.67b	26.67a	42.67a	0.00b	5.33a	0.00a	0.00a	581.33a
CD10	90.67 ^a	53.33a	37.33a	0.00a	21.33b	0.00a	42.67a	0.00b	0.00a	5.33a	37.33a	288.00a
CD11	16.00a	272.00a	0.00a	10.67a	0.00b	0.00a	32.00a	0.00b	0.00a	0.00a	0.00a	330.67a
CD12	90.67 ^a	64.00a	32.00a	0.00a	10.67b	10.67a	64.00a	0.00b	0.00a	0.00a	37.33a	309.33a
CD13	165.33a	69.33a	0.00a	0.00a	5.33b	37.33a	10.67a	0.00b	0.00a	5.33a	0.00a	293.33a
CD14	26.67 ^a	0.00a	0.00a	0.00a	0.00b	5.33a	16.00a	16.00a	0.00a	0.00a	10.67a	74.67a
CD15	90.67 ^a	5.33a	0.00a	0.00a	0.00b	10.67a	16.00a	0.00b	5.33a	0.00a	10.67a	138.67a
CD16	10.67 ^a	122.67a	5.33a	21.33a	0.00b	5.33a	10.67a	0.00b	5.33a	0.00a	0.00a	181.33a
CD17	149.33a	16.00a	5.33a	21.33a	21.33b	16.00a	10.67a	0.00b	0.00a	149.33a	10.67a	400.00a
CD18	85.33 ^a	32.00a	0.00a	5.33a	0.00b	37.33a	0.00a	0.00b	0.00a	48.00a	0.00a	208.00a
CD19	0.00a	266.67a	0.00a	26.67a	0.00b	10.67a	10.67a	5.33ab	0.00a	0.00a	0.00a	320.00a
CD20	53.33 ^a	272.00a	5.33a	0.00a	0.00b	26.67a	5.33a	0.00b	5.33a	250.67a	10.67a	629.33a
Promedio	79.00	182.13	6.40	4.27	22.67	18.93	20.00	1.33	1.60	29.73	7.47	373.53
D.E	59.84	188.51	12.19	8.58	53.58	21.51	17.80	3.82	3.05	64.05	11.91	222.79

Las letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$)

DE: Desviación Estándar

■ HYMENOPTERA ■ OLIGOCHAETA ■ ISOPTERA ■ CHILOPODA
■ COLEOPTERA ■ DIPLOPODA ■ OTROS



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Composición porcentual de la macrofauna del suelo.

Los Hymenoptera en conjunto con Isóptera y Oligochaeta, se les llaman “ingenieros del suelo” (FOLGARAIT, 1998). Estos producen una descomposición físico - mecánica de la hojarasca y cuando hacen excavaciones o crean galerías, van dejando restos de materia orgánica y excreta, que promueven la activación de los microorganismos, quienes comienzan la descomposición bioquímica (Fassbender, 1992 citado por SAENZ 2011).

VILLEGAS (2008), al evaluar la descomposición y liberación de nutrientes por parte de hojarasca del cacao y otras plantas de sombra en la zona de Alto Beni, Bolivia, determinó el tipo de meso y macrofauna que intervienen en dicho proceso. Encontró que el orden Hymenoptera fue el más abundante tanto en la época seca como humedad presentando una abundancia relativa del 30% y 37% respectivamente.

VELA (2009), al evaluar la Macrofauna del suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín establece para el cultivo de cacao manejado bajo el sistema agroforestal una densidad promedio de 527 ind/m². De un total de 13 órdenes, el orden Hymenoptera fue la más abundante con un 41.1% seguido del orden Isóptera con 34.2%.

Según SAENZ (2011), al evaluar la macrofauna y propiedades físico - químicas del suelo en sistemas agroforestales con cacao (*theobroma cacao* L.) y bosques secundario, el grupo más abundante fue Formicidae (42%), seguido de Oligochaeta (9%), Isóptera (6%), Aránea (5%), Diplopoda (5%), larvas y adultos de Coleóptera (5%), Isópoda (4%), Chilopoda (4%), Gastropoda (4%). Estos conforman el 92% del total, los otros 15 grupos equivalen al 8%.

Cuadro 16. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y algunos órdenes de macrofauna.

	Oligochaeta	Hymenóptera	Isóptera	Densidad total
Cd-suelo	0.508(*)	-0.198	0.049	0.034

*: Significativo ($p < 0.05$)

De acuerdo al Cuadro 16, se aprecia una correlación positiva significativa entre los valores de Cadmio en el suelo con los valores de los órdenes (ind/m²) como Oligochaeta y Coleóptera, mientras que se presenta una correlación positiva entre el cadmio del suelo y la densidad total así como el orden Isóptera; asimismo se aprecia una correlación negativa del cadmio del suelo con el orden Hymenóptera.

Según EDWARDS y LANNO (2004), mencionan que las lombrices son relativamente resistentes a los metales pesados, pueden bioacumular metales tales como el Cd.

4.6. De la actividad microbiana

En el Cuadro 17 se presentan los resultados de la respiración del suelo en las diferentes parcelas y las diferencias estadísticas entre parcelas.

Cuadro 17. Evaluación de la actividad microbiana

Lugar	CO ₂ (mg CO ₂ /100g de suelo).
CD1	1.789ab
CD2	1.660b
CD3	0.132c
CD4	2.002a
CD5	1.943a
CD6	2.002a
CD7	1.987a
CD8	2.024a
CD9	2.024a
CD10	1.980a
CD11	2.024a
CD12	1.826a
CD13	0.093c

CD14	0.037c
CD15	0.076c
CD16	0.037c
CD17	1.951a
CD18	1.92ab
CD19	2.046a
CD20	1.923a

Las letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Analizando los datos del Cuadro 17 se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las parcelas, siendo la parcela CD19 (Naranjillo) en la que se obtuvo una mayor actividad microbiana con 2.046 mg/100g de suelo; mientras que las parcelas CD16 y CD14 (Bella) fueron las que presentaron menor actividad microbiana con 0.037 mg/100g de suelo.

De acuerdo con el Cuadro 7 de las características físico químicas del suelo se determinó en la parcela CD19 (Naranjillo) valor del pH está en 7.53 lo cual indica que a mayor pH mejor para el crecimiento de microorganismos en especial bacterias, mientras que en CD16 y CD14 (Bella) se encontró un pH 5.6 y cuanto más ácido mayor presencia de hongos. Respecto al cadmio en el suelo CD19 (Naranjillo) a pesar de tener 0.59 ppm de cadmio disponible se presenta mayor actividad microbiológica en cambio en CD16 y CD14 (Bella) con menor contenido de cadmio 0.45 y 0.37 ppm respectivamente se tiene mayor actividad microbiológica lo cual puede deberse a que el cadmio se

presenta a un nivel por debajo de los límites permisibles y no influye en la actividad de los microorganismos.

Cuadro 18. Coeficientes de correlación del contenido de Cadmio disponible del suelo y la respiración microbiana del suelo.

	CO ₂
Cd -suelo	0.376

Ningún valor tuvo significancia estadística

En el Cuadro 18 al realizar los análisis de correlación se determinó una correlación positiva no significativa entre el contenido de cadmio en el suelo con la actividad microbiana determinado por la respiración del suelo. Esto puede ser debido a que los niveles de cadmio en el suelo en general no son muy altos, lo cual podría no influir en la actividad de los microorganismos.

4.7. Análisis de regresión lineal de las variables de interés

Cd-suelo: $- 0.07 + 0.296N\text{-foliar} - 0.174N\text{-almendra} + 0.153Cd\text{-foliar}$
 $R^2 = 0.824$

Cd-foliar: $0.984 + 3.013Cd\text{-suelo} + 0.513 \text{ acides} - 0.587\text{satual} + 9.682$
 $P\text{-foliar} - 1.035N\text{almendra} - 10.339Mg\text{-almendra} + 0.733Cd\text{-almendra}$
 $R^2 = 0.811$

Cd-almendras: $0.247 + 1.209\text{Cd-suelo} + 0.387\text{Cd-cascarilla} - 0.093\text{Cd-foliar}$

$$R^2 = 0.748$$

Cd-cascarillas: $-0.312 + 3.827\text{Mg-almendra} + 0.968\text{Cd-almendra} + 2.444\text{Cd-suelo} - 0.520\text{N-almendra} + 0.948\text{N-foliar} + 0.509\text{Cd-foliar}$

$$R^2 = 0.750$$

Analizando las regresiones lineales se determinó que las concentraciones de cadmio total en las almendras dependen de las variables de cadmio en el suelo y cadmio cascarilla en un 75% ($R^2 = 0.748$), además se encontró que el coeficiente de mayor influencia en las concentraciones de cadmio en las almendras es de la variable de cadmio en el suelo, por lo tanto se podría decir que las concentraciones de cadmio en las almendras dependen en un 75% de las concentraciones de cadmio en el suelo.

V. CONCLUSIONES

1. Los suelos estudiados en general presentan adecuadas condiciones físico – químicas a excepción de 17 parcelas con bajos niveles de K_2O (Kg/ha).
2. El valor promedio de cadmio disponible en los suelos es 0.66 ppm, el cual está por debajo de los límites permisibles.
3. El mayor contenido de cadmio disponible en el suelo entre todos fueron en las parcelas CD1 (Afilador), CD10 (Trampolín) y CD17 (Naranjillo); mientras que los menores valores se encontraron en las parcelas CD13, CD14 y CD15 (Bella).
3. El valor promedio de cadmio total a nivel foliar es 2.84 ppm, el cual está muy por encima de los niveles permisibles.
4. El valor promedio de cadmio total en almendras y cascarillas son 1.55 y 2.04 ppm respectivamente, los cuales están por encima de los límites permisibles.
5. El contenido de cadmio disponible en el suelo correlacionó positivamente y con alta significación estadística con el contenido de cadmio total foliar y almendra (0.857** y 0.737** respectivamente).
6. La densidad promedio de macrofauna del suelo fue de 373.53 ind/m², siendo el orden Hymenoptera con 182.13 ind/m² el más abundante, seguido de Oligochaeta e Isóptera con 79.00 y 29.73 ind/m² respectivamente. El contenido de cadmio en el suelo correlacionó positivamente y con significación estadística con el orden Oligochaeta (0.508*).

7. Se determinó una actividad microbiana con máximos de CO₂ de 2.064 mg/100g de suelo en la parcela CD19 (Naranjillo) y con un mínimo de 0.037 mg/100g de suelo en las parcelas CD14 y CD16 (Bella). El contenido de cadmio disponible en el suelo correlacionó positivamente con la respiración microbiana del suelo sin significación estadística (0.376).

VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Realizar trabajos de investigación más profundos en las parcelas CD1 (Afilador) y CD10 (Trampolín) en las cuales se encontró niveles de cadmio disponible altos.
2. Realizar evaluaciones de los niveles de cadmio en base a las almendras frescas y secas, teniendo en cuenta los procesos de fermentación y secado
3. Hacer evaluaciones con otros clones del cultivo de mejor calidad y realizar comparaciones para determinar en cuál de ellos ocurre una mayor absorción del cadmio.
4. Efectuar un mapeo utilizando el SIG a nivel provincial sobre la presencia de cadmio en el cultivo de cacao.
5. De acuerdo con la regresión lineal efectuada, realizar investigaciones en la relación cadmio suelo y cadmio en la almendra.

VII. RESUMEN

La presencia del Cadmio en el cultivo de cacao se está constituyendo en una dificultad para los agricultores y cooperativas. Para evaluar la presencia de cadmio en los suelos, hojas, almendras y cascarillas del cacao fue realizada la presente investigación. Para ello se seleccionaron 20 parcelas de agricultores de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo ubicadas en la Región Huánuco. Las muestras de suelo, foliar, almendra y cascarillas una vez obtenidas fueron enviadas al laboratorio para su respectivo análisis físico, químico, y biológico, de acuerdo a metodologías establecidas. En los análisis de suelo sólo en el caso del potasio se presentan en algunas parcelas deficiencias mientras que en el análisis foliar se presentan deficiencias generalizadas en los contenidos de N, P, K, y Cu; y a nivel de almendras no se presentan deficiencias a excepción de Fe y Zn. Los valores promedio de cadmio disponible en los suelos fue 0.66 ppm. A nivel foliar los valores promedio de cadmio total fue 2.84 ppm. A nivel de almendras y cascarillas los valores promedio de cadmio total fueron 1.55 ppm y 2.04 ppm respectivamente. Se determinó una densidad promedio de 373.53 ind/m², siendo el orden Hymenóptera el más abundante (49%). Se evaluó la actividad microbiana del suelo siendo el valor promedio de 1.474mg/100g de suelo.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. AIKPOKPODION, P. 2010. Nutrients Dynamics in Cocoa Soils, leaf and beans in Onto State, Nigeria. J. Agri. Sci 1(1): 1-9. Disponible en internet en la página web: www.krepublishers.com/02-Journals/JAS
2. ALLOWAY, B; JACKSON, A. 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludgeamended soil. The Science of the Total Environment. 100: 151-176.
3. ALLOWAY, BJ. 1995. Chapter 2: Soil process and the behavior of the heavy metals. In: Alloway, BJ. (ed.). Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional, London, 2nd edition, pp. 11-37. Disponible en internet en la página web: www.hindawi.com/journals/aess/2012/145724/ref/
4. ALLOWAY, BJ; STEINNES, E. 1999. Anthropogenic additions of cadmium to soils. En Cadmium in Soils and Plants (eds. McLaughlin, M.J. y Singh, B.R.), pp. 97-123. Disponible en internet en la página web: www.revistaecosistemas.net/pdfs/558.pdf
5. ANDERSON, J & INGRAM, J. 1993. Tropical biology and fertility, a handbook of methods. 2da ed. Walliford: Commonwealth Agricultural Bureau, 221p. Disponible en internet en la página web: www.aseanbiotechnology.info/Abstract/23007149.pdf
6. ASSADIAN, N; ESPARZA, L; FENN, L; ALI, A; MIYAMOTO, S; FIGUEROA, U; WARRICK, A. 1998. Spatial variability of heavy metals in irrigated alfalfa fields in the upper Rio Grande river basin.

- Agricultural Water Management. 36: 141-156. Disponible en internet en la página web: www.weru.ksu.edu/new_pdf
7. ASTOLFI, S; ZUCHI, S; PASSERA, C.2005. Effect of cadmium on H(+) ATPase activity of plasma membrane vesicles isolated from roots of different S-supplied maize (*Zea mays L.*) plants. Plant Science. 169:361-368. Disponible en internet en la página web: www.agriculturejournals.cz/publicFiles/50926.pdf
 8. ATLAS, R Y BARTHA, R. 2002. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. 4ta Edición Addison – Wesley. 696 pp.
 9. BAK, J; JENSEN, J; LARSEN, M; PRITZL, G; SCOTT-FORDSMAND, J. 1997. A heavy metal monitoring-programme in Denmark. The Science of the Total Environment. 207: 179-186. Disponible en internet en la página web: www1.agric.gov.ab.
 10. BANDICK, A.K. y DICK, R.P. 1999. Field management effects on soil enzymes activities. Soil Biology and Biochemistry 31(11):1471-1479. Disponible en internet en la página web: <http://www.scielo.br/scielo>
 11. BASTA, N.T; TABATABAI, M.A.1992. Effect of cropping systems on adsorption of metals by soils: II. Effect of pH. Soil Science. 153: 195-204. Disponible en internet en la página web: <http://www.reeis.usda.gov/web>
 12. BAUTISTA, A; ETCHEVERS, J; DEL CASTILLO, R; GUTIERREZ, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Asociación Española de ecología terrestre. En la revista científica y técnica de ecología y ambiente. pp. 92.

13. BENAVIDES, M; GALLEGO, S; TOMARO, M. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17:21-34. Disponible en internet en la página web: <http://www.scielo.br/>
14. BOEKHOLD, AE; TEMMINGHOFF, EJM; VAN DER ZEE, SEATM. 1993. Influence of electrolyte composition and pH on cadmium sorption by an acid sandy soil. *Journal of Soil Science*. 44: 85-96. Disponible en internet en la página web: <http://onlinelibrary.wiley.com/>
15. BOHN, H; MCNEAL, B; O'CONNOR, G. 1979. *Soil Chemistry*. New York. 329 p. Disponible en internet en la página web: <http://www.degruyter.com/view/j/intag.2012>
16. BRACK, A y MENDIOLA, C. 2000. *Ecología del Perú*. Asociación Editorial Bruño. Lima – Perú. 495 páginas.
17. BREJEDA, J.J. y MOORMAN, T.B. 2001. Identification and interpretation of regional soil quality factors for the Central High Plains of the Midwestern USA. *In*: D.E Stott. R.H. Mohtar and G.C Steinhardt (eds). *Sustaining the Global Farm*. pp. 535-540. Disponible en internet en la página web: <http://www.redalyc.org/redalyc/pdf>
18. BROWN, G.G. y DOMINGUES, J. 2010. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: princípios e práticas – o3º Encontro Latino Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligochaeta (ELAETAO3). *Acta Zoologica Mexicana (n.s.)*, Numero Especial 2: 1-18.

19. CARVALHO, F; ZHONG, N; KLAINE S. 1998. Rastreo de plaguicidas en los trópicos. Boletín del OEIA N°40. Disponible en internet en la página web: <http://www.reduas.fcm.unc.edu.ar>
20. CHRISTENSEN, TH; HAUNG, PM. 1999. Solid phase cadmium and the reactions of aqueous cadmium with soil surfaces. En: Cadmium in Soils and Plants (eds. McLaughlin, M.J. y Singh, B.R.), pp. 65-96. Disponible en internet en la página web: <http://orbit.dtu.dk/>
21. CLEMENS, S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 88:1707-1719. Disponible en internet en la página web: <http://www.researchgate.net/>
22. CLEMENS, S; ANTOSIEWICZ, D; WARD, J; SCHACHTMAN, D; SCHROEDER, J. 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. Disponible en internet en la página web: <http://www.pnas.org/>
23. CLEMENS, S; PALMGREN, M; KRAMER, U. 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*. 7: 309-315.
24. CONTRERAS, F; HERRERA, T; IZQUIERDO, A. 2002. 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. *Venesuelos*. 13:52-63. Disponible en internet en la página web: www.venesuelos.org.ve/

25. COOPERATIVA AGRARIA INDUSTRIAL NARANJILLO Ltda. 2011. Evaluación preliminar de cadmio en suelos tropicales y almendras de cacao en la influencia de la COOPAIN. Área de producción sostenible. Informe N° 03 -2011-APS-COOPAIN.
26. CUENCA, E. 2012. Efecto de la material orgánica y Fuentes de calcio en la toxicidad de cadmio en maíz (*Zea mays L.*). Tesis para optar el grado de magister scientiae en suelos. UNALM. Lima. pp. 64-72
27. DAS, P; SMANTARAY, S; ROUT, GR. 1998. Studies on cadmium toxicity in plants: A review. Environmental Pollution. 98: 29-36. Disponible en internet en la página web: <http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/>
28. DALAL, R.C. 1998. Soil microbial biomass – what the numbers really means Australian Journal of Experimental Agriculture, 38:649-665. Disponible en internet en la página web: <http://books.google.com.pe/>
29. DE MEEÚS, C; EDULJEE, G; HUTTON, M 2002. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers. The Science of the Total Environment 291:167-187. Disponible en internet en la página web: <http://www.ingentaconnect.com/>
30. DEL RIO, L; CORPAS, F; BARROSO, J; 2004. Nitric oxide and nitric oxide synthase activity in plants. Phytochemistry. 65: 783-792.
31. EDWARDS, C.A. AND LANNO, R., 2004. Soil animals in detoxification and bioremediation, organic waste treatment and ecosystem restoration: earthworms as an example. XIVth International

- colloquium on Soil Zoology and Ecology: Abstracts, session 6, p. 180.
32. ENCICLOPEDIA DE CONSULTA ENCARTA. 2003. Microsoft Corporation. Derechos Reservados. pp. 375- 378
 33. EVANS, L. J. 1989. Chemistry of metal retention by soils. Environmental Science and Technology. 23; 1046-1056. Disponible en internet en la página web: <http://rd.springer.com/>
 34. FACCHINELLI, A; SACCHI, E; MALLEEN, L. 2001. Multivariate statistical and GIS- based approach to identify heavy metal source in soils. Environmental Pollution. 114: 313-324. Disponible en internet en la página web: <http://www.scielo.br/pdf/>
 35. FOLGARAIT, P. 1998. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. Biodiversity and Conservation, 7, 1221-1244. Disponible en internet en la página web: <http://www.eko.uj.edu.pl/>
 36. FEIJOO, A. y E. KNAPP. 1998. El papel de los macroinvertebrados como indicadores de la fertilidad y perturbación de suelos de ladera. Suelos ecuatoriales 28: 254-259. Disponible en internet en la página web: <http://es.scribd.com/doc/>
 37. GARCÍA, I; DORRONSORO, C. 2005. Contaminación por metales pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. pp. 256-267. Disponible en internet en la página web: <http://redalyc.uaemex.mx/>
 38. GARCÍA, O. 2002. Efectos biológicos de campos magnéticos de muy baja frecuencia y radiofrecuencia en presencia de metales pesados:

- cadmio y mercurio. Tesis para optar el grado de Doctor. Universidad Complutense de Madrid. Madrid-España. 368 p. Disponible en internet en la página web: <http://www.ucm.es/>
39. GARNIER, L; SIMON-PLAS, F; THULEAU, P; AGNEL, J; BLEIN, J; RANJEVA, R; MONTILLET, J. 2006. Cadmium affects tobacco cells by a series of three waves of reactive oxygen species that contribute to cytotoxicity. *Plant Cell and Environment*. 29:1956-1969. Disponible en internet en la página web: <http://onlinelibrary.wiley.com/>
40. GILLER, K.E., WILTER, E. y MCGRATH, S.P. 1998. Toxicity of heavy metals to microorganism and microbial processes in agricultural soil: a review. *Soil Biology and Biochemistry* 30 (10-11), 1389-1414. Disponible en internet en la página web: <http://www.playffun.ru/ftp/library/>
41. GONZÁLEZ, C; THOMPSON, J; MARTÍNEZ, Y; SÁNCHEZ N. 2010. Concentración de cadmio en partículas de diferentes tamaños de un suelo de la Cuenca del Lago de Valencia. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*. 7 p.
42. GOUIA, H; GHORBAL, MH; MEYER, C. 2000. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiology and Biochemistry*. 38:629-638. Disponible en internet en la página web: <http://scialert.net/fulltext/>

43. GUERINOT, M. 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica Acta* 1465:190-198. Disponible en internet en la página web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/>
44. GUINCHARD, M. ET J. ROBERT. 1991. Approche biocenotique du systeme sol par l' étude du peuplement de larves d'insectes (premier e contribution). *Revue D'ecologie et de Biologie du Sol* 23(4): 479-490. Disponible en internet en la página web: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/>
45. HAMER, D. 1986. Metallothionein. *Annual Review of Biochemistry* 55:913-951. Disponible en internet en la página web: <http://www.copewithcytokines.de/>
46. HOUBA, V; LEXMOND, TH; NOVOZAMSKY, I; VAN DER LEE, J. 1996. State of the art and future developments in soil analysis for bioavailability assessment. *The Science of the Total Environment*. 178: 21-28. Disponible en internet en la página web: <http://scholar.lib.vt.edu/>
47. HUAMANI, H y HUAUYA, M. 2010. Evaluación de la condición nutricional del suelo y foliar en cultivo de café orgánico en Tingo María, Perú. En resúmenes del XII Congreso Nacional y V Internacional de la ciencia del suelo. Arequipa – Perú. 12 p.
48. IDIAF. 2004. (Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales) Resultados de investigación en Cacao. Santo Domingo, DO. 73 p. Disponible en internet en la página web: www.rediaf.net.do/publicaciones/pubidiaf.htm

49. INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. s/a. Disponible en internet en la página web: <http://www.ipni.net/>.
50. IRETSKAYA, S Y CHIEN, S. 1999. Comparison of cadmium uptake by five different food grain crops grown on three soils of varying pH. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal. 30:441 – 448. Disponible en internet en la página web: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/>
51. KABATA - PENDIAS, A. 1995. Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils. En: Heavy metals problems and solutions (eds W. Salomons et al.), pp 3-18. Disponible en internet en la página web: www.revistas.unal.edu.co/
52. KABATA-PENDIAS, A. 2000. Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Boca Ratón, USA.413 p. Disponible en internet en la página web: <https://www.agronomy.org/>
53. KABATA-PENDIAS, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. Geoderma. 122: 143-149. Disponible en internet en la página web: <https://www.agronomy.org/>
54. KARLEN, D.L., MAUSBACH, M.JDORAN, J.W., CLINE, R.G., HARRIS, R.F. y SHUMAN, G.E. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:4-10. Disponible en internet en la página web: <http://soils.usda.gov/sqi/>
55. KOJI, N. 1986. Critical concentration of cadmium in kidney cortex of humans exposed to environmental cadmium. Environ. Res. 40: 251 – 60. Disponible en internet en la página web: <http://www.sciencedirect.com/science/>

56. LASAT, M., 2000. The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow: 1-33. Disponible en internet en la página web: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/>
57. LAVELLE, P. 1996. Diversity of soil fauna and ecosystems function Biology International 33:3-16. Disponible en internet en la página web: <http://www.colby.edu/biology/>
58. LEON, J. 1987. Botánica de los cultivos tropicales. San José. Costa Rica. IICA, Colección Libros y Materiales Educativos 84. pp. 224-225.
59. LUCHO, C.A., ALVAREZ, M., BELTRAN, R.I., PRIETO, F. y POGGI, H. 2005. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. Environmental International, On line: 0160-4150-D 2004 doi:10.1016/j.envint.2004.08.002. Disponible en internet en la página web: <http://www.researchgate.net/publication/>
60. LUNA GUIDO, ML., VEGA JARQUIN, C., FRANCO HERNANDEZ, M.O., VASQUEZ, Z., TRUJILLO TAPIA, N., RAMIREZ, E., DENDOOVEN, L. 2002. Actividad microbiana de los suelos. Avance y perspectiva vol. 21, XXX Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería, Septiembre – Octubre. P. 328,331.
61. MAKSYMIEC, W; WOJCIK, M; KRUPA, Z. 2007. Variation in oxidative stress and photochemical activity in Arabidopsis thaliana leaves

subjected to cadmium and excess copper in the presence or absence of jasmonate and ascorbate. *Chemosphere*. 66:421-427.

Disponible en internet en la página web:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

62. MARTÍNEZ, C; MOTTO, H. 2000. Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. *Environmental Pollution*. 107: 153-158.
Disponible en internet en la página web:
<http://ecosystems.psu.edu/directory/>
63. McLAUGHLIN, MJ; SINGH, BR. 1999. Cadmium in soils and plants: a global perspective. In: McLAUGHLIN, M. J.; SINGH, B. R (Ed.). *Cadmium in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 1-19.
64. MCLEAN, J; BLEDSOE, B. 1992. Behavior of metals in soils. Environmental Protection Agency. 18: 1-25.
65. MONGE, O; VALENZUELA, J; ACEDO, E; CERTUCHA, M; ALMENDÁRIZ, F. 2008. Biosorción de cobre en sistema por lote y continuo con bacterias aerobias inmovilizadas en zeolita natural (clinoptilolita). *Int. Contam. Ambient*. 24: 107-115. Disponible en internet en la página web: <http://www.smbb.com.mx/revista/>
66. MSAKY, J; CALVET, R 1990. Adsorption behavior of copper and zinc in soils: influence of pH on adsorption characteristics. *Soil Science*. 150: 513-522.:
67. NATIONAL RESOURCE CONSERVATION SOIL (NRCS). 2004. What is soil quality? Unites States Department Agriculture. 17pp Disponible

en internet en la página web:

http://soils.usda.gov/sqi/soil_quality/what_is/.

68. NATURLAND, 2000. Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico. Guía de 18 cultivos. Cacao. 1^{ra} Edición. Alemania. 24 pp. Disponible en internet en la página web: <http://w.w.w.naturland.de>
69. NICHOLSON, F; SMITH, S; ALLOWAY, B; CARLTON-SMITH, C; CHAMBERS, B. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. The Science of the Total Environment. 311: 205-219. Disponible en internet en la página web: <http://www.ramiran.net/ramiran2010/>
70. NORVELL, WA; WU, J; HOPKINS, DG; WELCH, R. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chlorine and chelate-extractable soil cadmium. Soil Science Society of America Journal. 64: 2162- 2168. Disponible en internet en la página web: <https://www.soils.org/publications/>
71. NRIAGU, J. 1990. Global metal pollution. Poisoning the biosphere Environment. 32: 28-33.
72. OLALDE, V.P., AGUILERA, L.I. 1998. Microorganismos y Biodiversidad. Terra, Vol. 16 No.3. Disponible en internet en la página web: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf>
73. OLIVER, M. 1997. Soil and human health: a review. European Journal of Soil Science. 48: 573-592. Disponible en internet en la página web:

74. OMS – FAO (1992). Evaluación de diversos aditivos alimentarios y los contaminantes: mercurio, plomo y cadmio. Información técnica N° 50.
75. ORTIZ D; RUSCITTI, T; MCCUE, K; OW, D.1995. Transport of metal-binding peptides by HMT1, a fission yeast ABC-type vacuolar membrane protein. *Journal of Biological Chemistry* 270: 4721-4728. Disponible en internet en la página web: <http://www.jbc.org/content/>
76. ÓSTERÁS, A; GREGER, M. 2006. Interactions between calcium and copper or cadmium in Norway spruce. *Biología Plantarum* 50: 647-652. Disponible en internet en la página web: <http://www.ingentaconnect.com/content/>
77. PAPADOPOULOS, P; ROWELL, D. 1988. The reaction of cadmium with calcium carbonate surfaces. *Journal of Soil Science*. 39: 23-36.
78. PAPADOPOULOS, P; ROWELL, D. 1989. The reactions of copper and zinc with calcium carbonate surfaces. *Journal of Soil Science*. 40: 39-48.
79. PARK, S; CHENG, N; PITTMAN, J; YOO, K; PARK, J; SMITH, R; HIRSCHI, K. 2005. Increased Calcium levels and prolonged shelf life in tomatoes expressing Arabidopsis H⁺/Ca²⁺ transporters. *Plant Physiology*. 39:1194-1206. Disponible en internet en la página web: <http://www.ars.usda.gov/research/>
80. PINTO, AP; MOTA, AM; DE VARENNES, A; PINTO, FC. 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.

Disponible en internet en la página web:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

81. PINTO, E; SIGAUD-KUTHER, T; LEITAO, M; OKAMOTO, O; MORSE, D; COLEPICOLO, P. 2003. Heavy metal-induced oxidative stress in algae. *Journal of Phycology*. 39: 1008-1018.
82. POMPONI, N; CENSI, V; DI GIROLAMO, U; DE PAOLIS, A; DI TOPPI, L; AROMÓLO, R; CONSTANTINO, P^A CARDARELLI, M. 2006. Overexpression of Arabidopsis phytochelatin synthase in tobacco plants enhances Cd tolerance and accumulation but not translocation to the shoot. *Planta*. 223:180-190.
83. PRINCE, W; KUMAR, S; DOBERSCHUTZ, K; SUBBURAM, V. 2002. Cadmium toxicity in-mulberry plants with special reference to the nutritional quality of leaves. *Journal of Plant Nutrition*. 25:689-700.
Disponible en internet en la página web:
<http://www.tandfonline.com/>
84. REYES, E y A. MARIA. 2004. Contenido de metales pesados tóxicos (níquel, plomo, cobre, cadmio y manganeso) en el cacao de la provincia Monseñor Nouel. En: *Cacao. Resultados de Investigación*. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Santo Domingo. pp: 62 – 73.
85. RIEUWERTS JS; THONTON I; FARAGO ME; ASHMORE MR 1998. Factors influencing metals bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*. 10: 61-65.

Disponible en internet en la página web:

<http://www.ingentaconnect.com/content/>

86. RODRIGUEZ-SERRANO, M; ROMERO-PUERTAS, M; ZABALZA, A; CORPAS, F; GÓMEZ, M; DEL RÍO, L; SANDALIO, L. 2006. Cadmium effect on the oxidative metabolism of pea roots. Imaging of ROS and NO production in vivo. *Plant Cell and Environment*. 29: 1532-1544.
87. ROSS, S. 1994a. Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems (ed S.M. Ross), pp. 3-25.
88. ROSS, S. 1994b. Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. En: *Toxic metals in soil-plant systems* (ed S.M. Ross), pp. 63-152.
89. SAENZ, L. 2011. Macrofauna y propiedades físico – químicas del suelo en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao L.*) y bosques secundario en el sur occidente de Guatemala. 42p.
90. SALT, D; PRINCE, R; PICKERING, I; RASKIN, I. 1995. Mechanism of cadmium mobility and accumulation in indian mustard. *Plant Physiology*. 109: 1427-1433.
91. SÁNCHEZ, I. 2003. Determinación de metales pesados en suelos de medicina del campo (Valladolid). Contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia. 275 p.
92. SÁNCHEZ-MONEDERO, M; MONDINI, C; DE NOBILI, M; LEITA, L; ROIG, A. 2004. Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter. *Waste*

Management. 24: 325-332. Disponible en internet en la página web:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

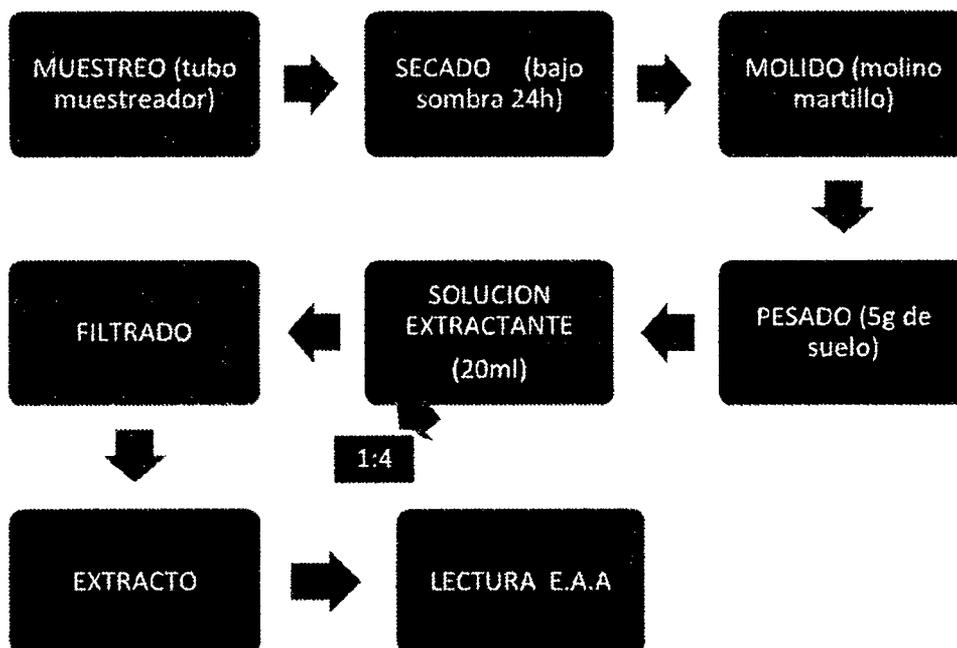
93. SANDALIO, L; DALURZO, H; GÓMEZ, M; ROMERO-PUERTAS, M; DEL RÍO, L. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*. 52:2115-2126.
94. SANITÁ DI TOPPI, L; GABBRIELLI, R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*. 41:105-130. Disponible en internet en la página web:
<http://www.ingentaconnect.com/content/>
95. SHAH, K; NONGKYNRIH, J. 2007. Metal hyperaccumulator and bioremediation. *Biología Plantarum*. 51: 618-634. Disponible en internet en la página web: <http://dspace.nehu.ac.in/bitstream/>
96. SILVA, C. 2004. Adsorcao competitiva de cadmio, cobre, níquel e zinco em solos. Tesis Mestrem agronomía, área de concetracao: Solos e nutricao de plantas. Piracicaba, Estado de Sao paulo, Brazil. 79p.
97. SILVIERA MLA; ALLEONI LRF; GUILHERME LRG. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agrícola*. 60: 793-806. Disponible en internet en la página web: <http://rcrec-ona.ifas.ufl.edu/faculty/silveira.shtml>
98. SINGH, P; TEWARI, R 2003. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. *Journal of Environmental Biology* 24:107-112.

99. SNOECK, J. 1984. En: MARTIN – PREVEL, P.; GAGNARD, J.; GAUTHIER, P. (eds.): L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Technique et doc., Lavoisier, Paris, France (1984). pp. 17-25. Disponible en internet en la página web: www.fertilizer.org/ifa/content/
100. SPOSITO, G. 1989. The chemistry of soils. New York: Oxford University. 277 p.
101. STALIKAS, C; PILIDIS, G; TZOUWARA-KARAYANNI, S. 1999. Use of a sequential extraction scheme with data normalisation to assess the metal distribution in agricultural soils irrigated by lake water. The Science of the Total Environment. 236: 7-18.
102. STIGLIANI, WG. 1993. Overview of the Chemical Time Bomb problem in Europe. In: Meulen GRB Stigliani WG; Salomons W; Bridges EM; Imenson AC. (Eds.) Chemicals in Soils and Sediments. Veldhoven, the Netherlands, 1992. Hoofddorp, the Netherlands, pp 13-29.
103. STOEPLER M. 1991. Cadmium. In: Merian E. (ed). Metals and their compounds in the environment. VCH, New York, pp 803-851. Disponible en internet en la página web: www.marinepolicy.net/
104. STRICKLAND, R; CHANEY, W; LAMOREAUX, R. 1979. Organic matter influences phytotoxicity of cadmium to soybeans. Plant and Soil. 52: 393-402. Disponible en internet en la página web: <http://link.springer.com/article/>
105. THOMINE, S; WANG, R; WARD, J; CRAWFORD, N; SCHROEDER, J. 2000. Cadmium and iron transport by members of a plant metal

- transporter family in Arabidopsis with homology to Nramp genes. Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 97:4991-4996. Disponible en internet en la página web: <http://www.pnas.org/content/>
106. TILLER, K. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. Advances in soil science. 9: 113-142.
107. VELA, M. 2009. Macrofauna del suelo en 3 sistemas diferentes de uso de la tierra en San Martín. Tesis para optar el Título de Ing. en Recursos naturales Renovables UNAS. 70 pp.
108. VILLEGAS, R. 2008. Descomposición de las hojas de cacao y de seis especies arbóreas, solas y en mezcla en Alto Beni, Bolivia. Tesis Mag. Sc CATIE, Costa Rica. 82 p. Disponible en internet en la página web: <http://worldcocoafoundation.org/villegas-caceres>
109. WALSH S.A. PERU 2010. E.C. Huallaga. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Central Hidroeléctrico Chaglla. Cap.4.2.6 pp.48.
110. WARD, NT. 1995. Trace elements. Environmental Analytical Chemistry. Ed. By FW Fifield and P.J. Haines. Capman. pp. 156
111. WEBER, J; KARCZEWSKA, A. 2004. Biogeochemical processes and the role of heavy metals in the soil environment. Geoderma. 322: 105-107. Disponible en internet en la página web: <http://www.sciencedirect.com/science/>
112. WETERMAN, R. L. 1990. Soil testing and plant analysis. 3rd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. 75p.

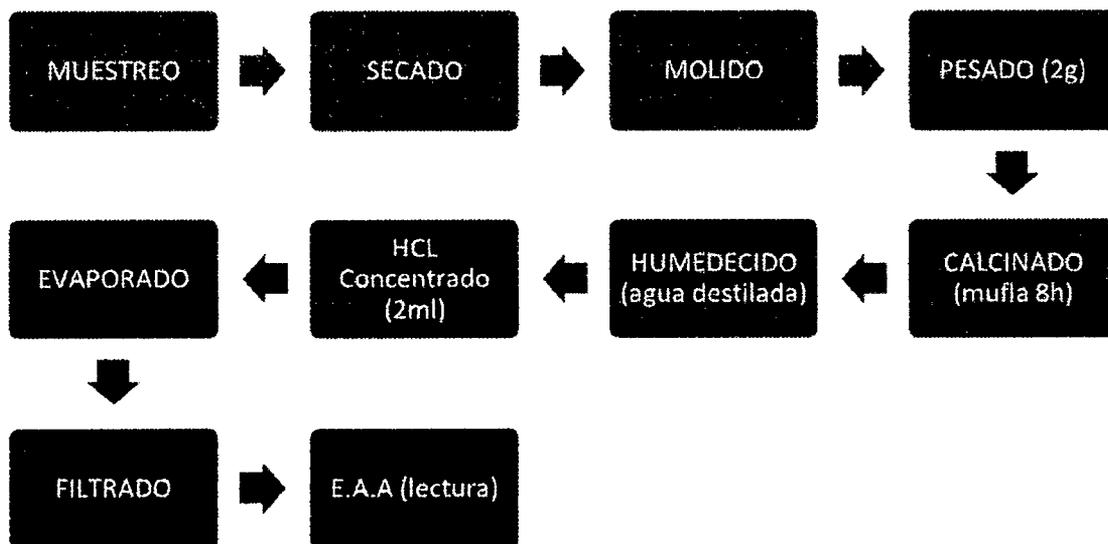
113. WOLTERS, V. y K. EKSCHMITT. 1997. Gastropods, Isopods, Diplopods, and Chilopods: Neglected groups of the decomposer food web. pp. 265-306. In: Benckiser, G. (ed.). Fauna in soil ecosystems: recycling processes nutrient fluxes and agricultural production. Marcel Dekker, Inc, New York.
114. ZHELJAZKOV, V; WARMAN, P. 2003. Application of high Cu compost to Swiss chard and basil. The Science of the Total Environment. 302: 13-26. Disponible en internet en la página web: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

IX. ANEXO



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Metodología de análisis de Cadmio disponible.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Metodología de análisis de Cadmio total vía seca

Anexo 1. Formato de recolección de muestras.

FORMATO DE RECOLECCION DE MUESTRAS

DATOS PERSONALES

Código	Apellidos	Nombres	Lugar

MUESTREO DE ALMENDRAS

DATOS DEL CULTIVO

Cultivo Anterior	Fert./abonos Anteriores	Hibrido/Clon	Edad	Área	Fisiografía/ Inundable No Inund.	Fert. /Abo. Usados Act.	Practicó la quema	Numero de frutos muestreados	Sub muestra
								20	Zigzag

DATOS DE BENEFICIO DEL CACAO

Mat. De Fermentación	Mat. De Secado	Peso de Muestra
	Manta de yute	500 g

MUESTREO DE HOJAS

Cultivo Anterior	Fertilizantes/Abonos Usados aplicación foliar	Numero de plantas muestreadas	Numero de hojas por planta	Sub Muestras
		20	2	zigzag

EXTRACION DE SUELO

Profundidad	Sub-Muestras	Fisiografía (Inund. /no Inund.)	Hibrido/Clon	Edad de la Planta	Cultivo Anterior	Fert. Anteriores	Abonam. Actual	Abonos Usados	Aplicación Foliar	Enmienda	Quemó Ante.	Pres. Pilas y Plásticos
25 cm	zigzag											

Observaciones:



Figura 10. Muestreo de los campos evaluados.

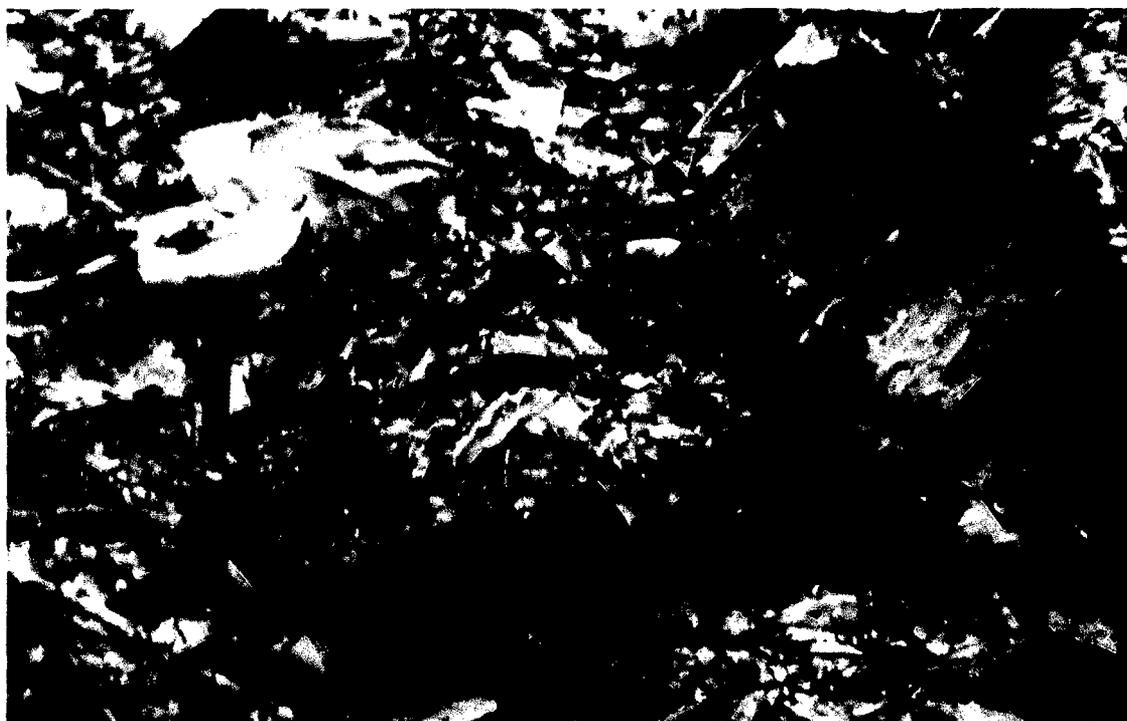


Figura 11. Recolección del monolito de suelo para el análisis de macrofauna.



Figura 12. Muestreo de hojas de cacao.



Figura 13. Muestreo de las mazorcas de cacao.

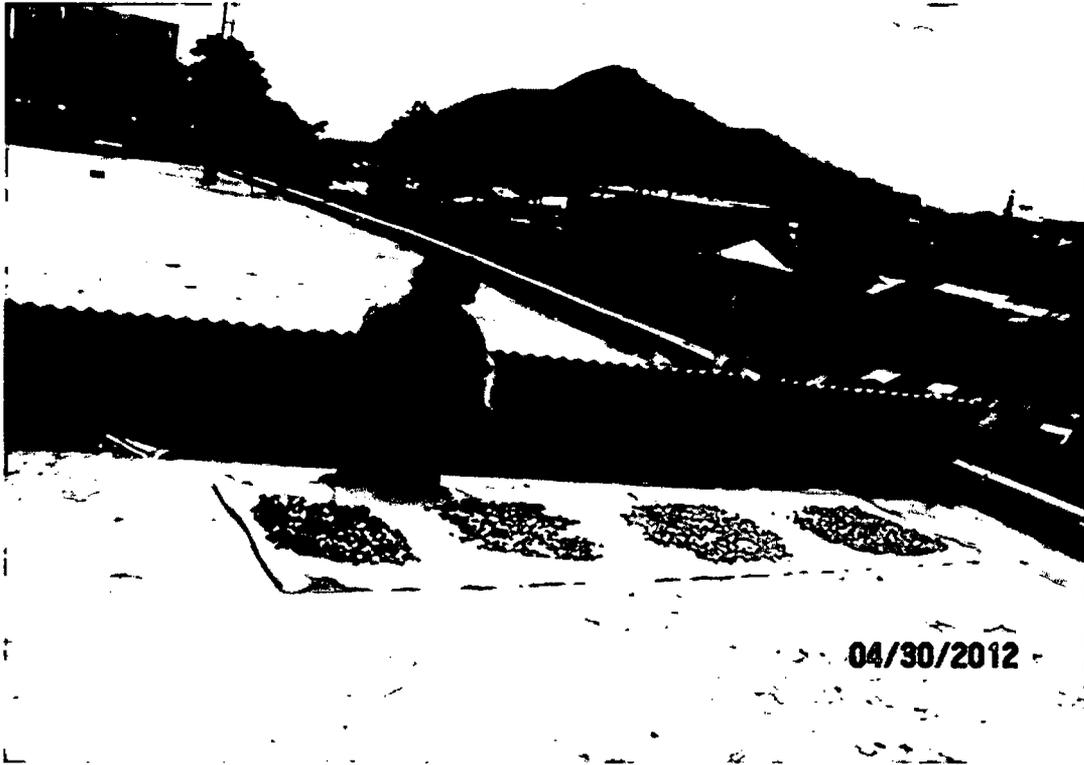


Figura 14. Secado de la almendra de cacao.



Figura 15. Realización de los análisis en el laboratorio de suelo.