

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**SELECCIÓN POR HIPOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS
EN ÓRGANOS VEGETATIVOS Y REPRODUCTIVOS DE CLONES
DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN LA ESTACIÓN TULUMAYO**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

**ELABORADO POR
JENNIFER JACKELINE GARCÍA RODRÍGUEZ**

**ASESOR
LUIS FERNANDO GARCIA CARRION**

Tingo María – Perú

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE AGRONOMÍA

Carretera Central Km 1.21 Telf. (062) 562341 (062) 561136 Fax. (062) 561156 E.mail: fagro@unas.edu.pe



"Año del dialogo y la Reconciliación Nacional"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Nº 029-2018-FA-UNAS

BACHILLER : GARCIA RODRIGUEZ, Jennifer Jackeline

TÍTULO : "Selección por hipoacumulación de metales pesados en órganos vegetativos y reproductivos de clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la estación Tulumayo".

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. Hugo A. Huamani Yupanqui
VOCAL : Ing. Jaime Chávez Matías
VOCAL : Ing. M.Sc. Abner Cello Iglesias Cruz

ASESOR : Ing. M Sc. Luis García Carrión
CO – ASESOR : Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 09 de noviembre de 2018.

HORA DE SUSTENTACIÓN : 08: 30 a.m.

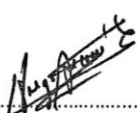
LUGAR DE SUSTENTACIÓN : SALA DE AUDIOVISUALES DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

CALIFICATIVO : MUY BUENO

RESULTADO : APROBADO

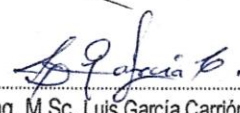
OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

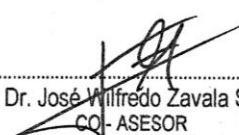
TINGO MARÍA, 14 DE NOVIEMBRE DE 2018.


.....
Dr. Hugo A. Huamani Yupanqui
PRESIDENTE


.....
Ing. Jaime Chávez Matías
VOCAL


.....
Ing. M.Sc. Abner Cello Iglesias Cruz
VOCAL


.....
Ing. M Sc. Luis García Carrión
ASESOR


.....
Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano
CO- ASESOR

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme dado la gracia y la dicha de compartir cada etapa y logro de mi vida junto a las personas que amo, pues toda bonanza viene de él.

A mis queridos padres

Luis F. García Carrión y Manuela Rodríguez Sánchez de García, por el gran amor y apoyo incondicional; moral y económico para la culminación de mi carrera profesional.

A mis queridos hermanos

Patricia y Luis, por ser día a día ejemplo de superación y profesionalismo cimentado en la ética y moral.

A la Congregación de Religiosas de Jesús – María

Por ser presencia viva de Dios en mi vida. Por su labor, esfuerzo y servicio en favor de la sociedad a través de la educación y formación en valores cristianos.

AGRADECIMIENTOS

- A La Universidad Nacional Agraria de la Selva–Tingo María y docentes-investigadores de la Facultad de Agronomía, por sus valiosos conocimientos asimilados durante mi carrera profesional.
- A Ing. M. Sc. Luis Fernando García Carrión (Patrocinador), por su dirección y apoyo durante la ejecución y culminación de la tesis.
- A Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano (Co-patrocinador), por su revisión y aportes que enriquecieron esta tesis.
- A Jurado de tesis: Dr. Hugo Alfredo Huamaní Y. (Presidente), Ing. Jaime Chávez M. e Ing. M. Sc. Abner Iglesias C. (Miembros), por el apoyo logístico y las valiosas sugerencias a esta tesis.
- A Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), proyecto “Estrategias Tecnológicas para Reducir el Contenido de Cadmio en las Almendras del Cultivo de Cacao” (Convenio de Subvención N° 101-2015-FONDECYT), por el financiamiento recibido para la ejecución de la tesis.
- A Mis amigos del laboratorio de suelos: Ing. Gilmer Neyra T., Téc. Zósimo Pujay, Ing. Miguel Sánchez y compañeros: Tony Grandez A., Hevila Damiano T., Iris Mezones Alarcon, Mary C. Félix M., Alexander Ortega y María Malca.

INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCION	10
II.	REVISION DE LITERATURA.....	13
	2.1 Generalidades sobre los metales pesados	13
	2.2 Los metales pesados en el suelo	16
	2.2.1 Fuentes de contaminación.....	16
	2.2.2 Dinámica de la contaminación	18
	2.3 Metales pesados (cadmio y plomo) en las plantas	19
	2.3.1 Ingreso, transporte y acumulación de cadmio (Cd)	19
	2.3.2 Ingreso, transporte y acumulación de plomo (Pb)	22
	2.4 Estudios sobre el cadmio y plomo en cacao.....	24
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
	3.1 Campo experimental	26
	3.1.1 Ubicación.....	26
	3.1.2 Historia	27
	3.1.3 Registros meteorológicos	28
	3.1.4 Materiales, herramientas y equipos.....	28
	3.1.5 Origen o procedencia del material genético	28
	3.2 Ejecución del experimento	29
	3.2.1 Muestreo del suelo del campo experimental	29
	3.2.2 Análisis físico-químico inicial del suelo	30
	3.2.3 Elección de clones de cacao	30
	3.2.4 Metodología de extracción y evaluación.....	30

3.2.5	Análisis químico del tejido foliar, frutos y semillas.....	32
3.3	Análisis estadístico	33
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	35
4.1	Cinética de acumulación del cadmio en hojas, frutos y semilla	35
4.2	Cinética de acumulación del plomo en hojas, frutos y semillas	45
4.3	Interacción entre cadmio, plomo y micronutrientes de las semillas ...	54
4.4	Análisis químico (inicial y final) del suelo	62
V.	CONCLUSIONES	67
VI.	RECOMENDACIONES.....	68
VII.	RESUMEN	69
	ABSTRACT	71
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
IX.	ANEXO	85

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Datos meteorológicos registrados en la Estación meteorológica de Tulumayo (junio-noviembre, 2017)	27
2. Relación de cinco clones de cacao y genealogía	29
3. Análisis físico-químico inicial del suelo experimental	31
4. Acumulación de cadmio en hojas (ppm) de cinco clones de cacao	35
5. Acumulación de cadmio (ppm) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	40
6. Acumulación de cadmio (ppm) en semillas de cinco clones de cacao.....	43
7. Acumulación de plomo (ppm) en hojas de cinco clones de cacao	45
8. Acumulación de plomo (ppm) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	49
9. Acumulación de plomo (ppm) en semillas de cinco clones de cacao	52
10. Contenidos promedios (ppm) de metales no esenciales (cadmio y plomo) y esenciales (Zn, Fe, Cu y Mn) en semillas de cinco clones de cacao	55
11. Matriz de coeficientes de correlación simple entre cadmio, plomo y micronutrientes de la semilla de cinco clones de cacao	58
12. Análisis químico del suelo (inicial y final) y estadísticos descriptivos de tendencia central y dispersión.....	62
13. Plan de abonamiento del campo experimental (ex semillero de papayo).....	86

14.	Contenido de cadmio, plomo y micronutrientes (ppm) en hojas de cinco clones de cacao.....	87
15.	Contenido de cadmio, plomo y micronutrientes (ppm) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.....	88
16.	Contenidos de cadmio, plomo y micronutrientes (ppm) en las semillas de cinco clones de cacao.....	89
17.	Contenido de macronutrientes (%) en hojas de cinco clones de cacao...	90
18.	Contenido de macronutrientes (%) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	91
19.	Contenido de macronutrientes (%) en las semillas de cinco clones de cacao	92
20.	Resultados del análisis físico-químico inicial del suelo	93
21.	Matriz de correlaciones simples entre clones, cadmio, plomo y micronutrientes en las semillas cinco clones de caca.....	94
22.	Caracterización organoléptica de las semillas frescas de cinco clones de cacao en la Estación Tulumayo	94

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Curva de regresión polinómica de acumulación de cadmio en hojas de cinco clones de cacao.....	36
2. Cinética de acumulación de cadmio en hojas de cinco clones de cacao.	37
3. Curva de regresión polinómica de acumulación de cadmio en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	41
4. Cinética de acumulación de cadmio en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	42
5. Curva de regresión polinómica de acumulación de cadmio en semillas de cinco clones de cacao.....	44
6. Cinética de acumulación de cadmio en semillas de cinco clones de cacao	44
7. Curva de regresión polinómica de acumulación de plomo en hojas de cinco clones de cacao.....	46
8. Cinética de acumulación de plomo en hojas de cinco clones de cacao...	47
9. Curva de regresión polinómica de acumulación de plomo en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	50
10. Cinética de acumulación de plomo en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao	51
11. Curva de regresión polinómica de acumulación de plomo en semillas de cinco clones de cacao.....	53
12. Cinética de la acumulación de plomo en semillas de cinco clones de	

cacao	54
13. Diagrama biplot de clones de cacao, metales pesados (cadmio, plomo) y micronutrientes (Zn, Fe, Cu y Mn), en semillas de cacao	61
14. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-08)	95
15. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-12)	95
16. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-23)	96
17. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-28)	96
18. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon C-60)	97

I. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L), es una especie neotropical cuyas almendras se utilizan en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. Debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antitumorales, su demanda externa sigue creciendo en forma sostenida.

Por su parte, la acumulación de metales pesados en las plantas tiene como origen la deposición atmosférica, la aplicación de aguas residuales, el uso de fertilizantes fosfatados y las actividades industriales (VERBRUGGEN *et al.*, 2009)

Los estudios de análisis de suelos y plantas en nuestro país reportan la presencia de metales pesados como el cadmio (Cd), plomo (Pb), Arsénico (As), mercurio (Hg), etc., que son tóxicos para la salud y se acumulan en el suelo, hojas y semillas del cacao. Las almendras comercializadas como producto terminado (chocolates) y consumidas en forma masiva, pueden o no reunir la garantía de la inocuidad alimentaria.

El ingreso y acumulación de los metales pesados no esenciales para las plantas, constituye la ruta de entrada a la cadena alimenticia. Una profunda y completa comprensión de los mecanismos fundamentales de absorción, transporte, distribución y acumulación en los órganos aéreos puede ayudar a la remediación evitando su hiperacumulación.

En la actualidad, el conocimiento de los procesos bioquímicos y genéticos involucrados en la tolerancia a este metal y su acumulación en las plantas, es todavía limitado. También lo es nuestro conocimiento sobre las respuestas fisiológicas de los cultivares de cacao (clones y/o híbridos) a las concentraciones de cadmio y plomo en el suelo, el transporte y acumulación en los órganos vegetativos y reproductivos.

En este contexto, los estudios de contaminación del suelo y plantas con metales pesados (cadmio, plomo y otros), son pertinentes y urgentes, pues el suelo es la fuente de origen y la planta el lugar de acumulación. De allí que el binomio suelo-planta debe ser investigado para conocer la respuesta diferencial de los genotipos de cacao a la absorción y acumulación de cadmio y plomo en su biomasa aérea.

Objetivo general

Estudiar la cinética de la acumulación de metales pesados (cadmio y plomo) en cinco clones promisorios de cacao, identificando aquellos con reducida acumulación (hipoacumulación), en órganos vegetativos y reproductivos.

Objetivos específicos

1. Evaluar la cinética de la acumulación de cadmio y plomo en los órganos aéreos (hojas, frutos y semillas) de cinco clones de cacao.

2. Identificar y seleccionar al menos un clon de cacao tolerante a la acumulación de cadmio y/o plomo, a nivel de semillas.

3. Determinar interacciones fisiológicas entre el cadmio, plomo y los micronutrientes: Zn, Fe, Cu y Mn, a nivel de semillas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades sobre los metales pesados.

La demanda de consumidores por chocolates de mejor calidad e inocuos para la salud se incrementa en los países desarrollados (USA, Bélgica, Alemania, Suiza y otros). Por su parte, la producción de cacao para que sea sostenible, requiere de la adopción de buenas prácticas agrícolas (BPA), una relación armoniosa con el ambiente; trazabilidad y certificación del producto cosechado.

En décadas pasadas, los metales pesados fueron denominados “metaloides” por los científicos; sin embargo, actualmente se prefiere denominarlos “metales traza” por sus bajas concentraciones ($< 100 \text{ mg kg}^{-1}$) que no son detectables por métodos químicos convencionales (WARD, 1995; HOODA, 2010). Los metales pesados son persistentes, i.e., no pueden ser creados o degradados ni por procesos biológicos, ni por la actividad antropogénica (REYES *et al.*, 2016)

Los metales pesados son elementos químicos que se clasifican como esenciales (de función biológica conocida) y no esenciales (sin función biológica conocida). Algunos metales pesados en muy bajas concentraciones, como el cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), etc., son esenciales en los procesos bioquímicos y fisiológicos de las plantas formando parte integral de muchas enzimas y otras proteínas; en cambio, otros como el cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As), cromo (Cr), etc., no son esenciales (por la poca

evidencia de rol nutritivo en plantas y animales superiores), y que en altas concentraciones, provocan toxicidad durante el crecimiento y desarrollo de las plantas (BENAVIDES *et al.*, 2005; HOODA, 2010; ZITKA *et al.*, 2013)

Los metales pesados contaminan a los componentes bióticos y abióticos de la agrobiodiversidad. Las plantas difieren marcadamente en su sensibilidad a los metales y por extensión, a los iones metálicos que son captados por las células y luego distribuidos al interior de la misma. La elevada concentración de metales pesados en la rizósfera del suelo, los mecanismos de selectividad y transporte, y el nivel de toxicidad en los órganos aéreos, ejercen presión de selección en las poblaciones vegetales localmente adaptadas.

En la actualidad se acepta que la distribución, movilidad, disponibilidad biológica y toxicidad de los elementos químicos no es función de la concentración total de ellos, sino que depende de la forma química en que éstos se encuentran (Caruso *et al.*, 2003; Hirose, 2006, citado por REYES *et al.*, 2016). Hay necesidad de conocer las especies químicas de los elementos para comprender las reacciones químicas y bioquímicas en los que intervienen, y por tanto, obtener información relativa al carácter esencial y tóxico de los elementos químicos (REYES *et al.*, 2016)

Entre los metales pesados nocivos para los cultivos, la salud y el ambiente, tenemos el cadmio (Cd), que se libera y acumula en el ambiente como subproducto del procesamiento de refinerías de zinc (Zn) y/o de cobre (Cu). El cadmio no

solamente es fuente principal de emisión a la atmósfera, sino también, de contaminación de los mantos acuíferos y suelos (MARTÍNEZ *et al.*, 2012)

La fitotoxicidad de los metales pesados puede resultar de la alteración de numerosos procesos fisiológicos involucrados a nivel celular y/o molecular mediante: a) la inactivación de enzimas, b) bloqueo de grupos funcionales de importantes moléculas metabólicas, c) desplazamiento o sustitución de elementos esenciales y d) desorganización de la integridad de las membranas celulares (DOUCHICHE *et al.*, 2010)

Si bien la contaminación por gases de escape de vehículos rodantes ha disminuido por la eliminación de plomo (Pb) como aditivo de la gasolina; sin embargo, en la mayoría de países, aún constituye una fuente de contaminación; por tanto, el cacao no debe secarse ni almacenarse cerca de las vías con intenso tráfico. El Codex Alimenticio ha publicado un código de prácticas (CAC/RCP 56-2004) para prevenir y reducir la contaminación de plomo en los alimentos.

Un dictamen científico emitido sobre el plomo en los alimentos (EFSA CONTAM, 2010, 2012), sostiene que los granos y los productos semi-elaborados de cacao y chocolate, contribuyen de modo menor a la exposición al plomo, no considerándose límites máximos para este metal en los productos de cacao (polvo y/o grano); así como, en el chocolate.

2.2 Los metales pesados en el suelo.

Entre los metales pesados no esenciales y contaminantes del suelo y de las plantas se tiene al cadmio y el plomo. El cadmio (Cd) pertenece al grupo IIB de la Tabla Periódica de los Elementos. Este metal posee un número atómico 48, número de masa atómica 112, densidad 13.5 g/cm³ a 20°C, valencia +2, punto de fusión 321°C y punto de ebullición 765°C (KABATA-PENDIAS, 2011)

En cambio, el plomo (Pb) pertenece al grupo IVA de la Tabla Periódica de los Elementos. Este metal posee un número atómico 82, número de masa atómica 207.20, densidad 11.3 g/cm³ a 20°C y valencias +2 y +4 (RAHIMZADEH, *et al.*, 2017)

2.2.1 Fuentes de contaminación

El cadmio del suelo se origina de fuentes naturales y aproximadamente 25,000 tn/año se liberan al ambiente por las actividades antropogénicas. Cerca de la mitad de cadmio se libera a los ríos por meteorización de las rocas, algo de cadmio se libera al aire por los incendios forestales y erupciones volcánicas, y el resto se libera por otras actividades antropogénicas. De las aguas residuales, el cadmio ingresa a los ríos y arroyos contaminando otros lugares de acumulación, v.g. pantanos, y también contamina el manto freático (MORADI *et al.*, 2005)

RODRIGUEZ-SERRANO *et al.*, (2008), cita a Regoli (2005), quien reporta que el cadmio tiene como fuentes de contaminación: a) fertilizantes fosfatados (34%), b) combustión de fósiles (21%), c) fuentes naturales (21%), d) producción de metales y acero (12%), e) fabricación de cementos, asfalto, entre otros (7%), f) producción de metales no ferrosos (4%), g) incineración de basura (1%) y h) productos de cadmio (0.3%)

El principal factor determinante del contenido de cadmio en el suelo es el material litológico. El rango promedio de cadmio en los suelos oscila entre 0.2 y 1.1 mg kg⁻¹. La concentración media global de cadmio en el suelo es estimada en 0.41 mg kg⁻¹. Durante los procesos de meteorización, el cadmio forma compuestos simples, como: CdO, Cd (OH)₂, CdCl₂ y CdF₂, que son fácilmente móviles y le sigue al Zn, especialmente en los procesos de sedimentación (KABATA-PENDIAS, 2011)

La concentración de cadmio en la solución del suelo de suelos no contaminados está en el rango de 0.04-0.32 uM, mientras que los suelos moderadamente contaminados contienen 0.32-1.00 uM (Wagner, 1993, citado por BENAVIDES *et al.*, 2005). Se señala que la concentración de cadmio en suelos no contaminados está por debajo de 0.5 mg kg⁻¹ pero puede alcanzar hasta 3.0 mg kg⁻¹ dependiendo del material parental del suelo (Vahter *et al.*, 1991, citado por NAZAR *et al.*, 2012)

Por su parte, el contenido de plomo en suelos de diferentes países, oscila entre 18 - 32 mg kg⁻¹, estimándose una media de 27 mg kg⁻¹ para diferentes suelos. Sin embargo, en ciertos grupos de suelos, v.g. Cambisoles, los valores de plomo son superiores llegando hasta 90 mg kg⁻¹, lo cual indicaría contaminación por plomo (KABATA-PENDIAS, 2011)

2.2.2 Dinámica de la contaminación

La dinámica de los metales pesados en el suelo se puede clasificar en cuatro vías: a) movilización de aguas superficiales y/o subterráneas, b) transferencia por volatilización a la atmósfera, c) absorción por las plantas e incorporación en las cadenas tróficas y d) retención de metales pesados en el suelo, pudiendo estar disueltos o fijados, retenidos por adsorción, acomplejados y/o precipitados (GARCIA y DORRONSORO, 2005)

La concentración de metales pesados está relacionada con las condiciones del cultivo. Cultivos expuestos al aire libre exhiben bajas concentraciones de As, Cd, Cu, Hg y Zn, pero elevadas concentraciones de Pb, siendo la deposición atmosférica la principal causa de esta contaminación; mientras que en cultivos de invernadero, las concentraciones son bajas (REYES *et al.*, 2016)

El plomo aparece de forma natural en el suelo; sin embargo, su disponibilidad depende de factores como: el pH y contenido de M.O. La contaminación de plomo en el medio ambiente también tiene como origen los

incendios forestales, las operaciones de minería y fundición, la extracción de petróleo y la quema de combustibles fósiles (BALIGAR *et al.*, 2001)

2.3 Metales pesados (cadmio y plomo) en las plantas.

En las plantas, la dinámica y disponibilidad de los metales pesados se ven afectados por el pH, contenido de la materia orgánica, textura del suelo, genotipo de la planta y concentración en el medio de crecimiento (BUSINELLI *et al.*, 2009; ALLOWAY, 2013). Las plantas desarrollan algunas funciones para la tolerancia al Cd^{+2} , como: a) adhesión a la pared celular, b) quelación por las fitoquelatinas, c) compartimento (inmovilización) del Cd^{+2} en la vacuola y d) enriquecimiento de los tricomas foliares (ZHI, *et al.*, 2006)

2.3.1 Ingreso, transporte y acumulación del cadmio

El cadmio causa severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte del agua en las plantas (Singh y Tewari, 2003, citado por REYES *et al.*, 2016). Varios reportes hacen referencia al pH del suelo, como el principal factor que controla la absorción relativa del cadmio total.

Un estudio con plántulas de arroz reporta que la relativa absorción de cadmio fue mayor en un rango de pH: 4.5 - 5.5. La distribución del cadmio dentro de los órganos vegetales fue bastante variable y visible; así como, su rápido

transporte desde las raíces hasta la parte aérea, en particular, hacia las hojas (Kitagishi y Yamane, 1981, citado por KABATA-PENDIAS, 2011)

Entre el 55 y 90 por ciento de cadmio en la solución del suelo se presenta como ión metálico libre (Cd^{+2}), que es fácilmente disponible a las plantas. Además de los compuestos inorgánicos, el cadmio en la solución del suelo forma complejos con varios ácidos orgánicos, aminoácidos, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Este metal se absorbe fácilmente en los sistemas radiculares y el tallo, y se acumula en los organismos del suelo. Una apreciable fracción es captada pasivamente por las raíces y la otra se absorbe metabólicamente (Taylor y Percival, 2001, citado por KABATA-PENDIAS, 2011)

En la planta, el cadmio se acumula preferentemente en la raíz compartimentalizado en las vacuolas celulares y solo una pequeña parte, es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente: tallos > hojas > frutos > semillas (CHAN y HALE, 2004). 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, citado por BENAVIDES *et al.*, 2005)

Si bien hasta ahora no ha sido reportado que el cadmio sea un elemento esencial para las plantas, su toxicidad se debe a la habilidad para reemplazar los cationes Ca^{+2} o Zn^{+2} en las proteínas; así como, su alta reactividad con los grupos tiol. Las plantas lo absorben de la solución del suelo, lo transportan

y acumulan principalmente en los órganos aéreos utilizando rutas metabólicas aún no bien comprendidas (VERBRUGGEN *et al.*, 2009).

Entre las proteínas responsables de la entrada del cadmio a la célula destaca el transportador específico del calcio LCT1 y la proteína IRT1 perteneciente a la familia de transportadores ZIP del Zn y Fe (GUERINOT, 2000). Una vez dentro de la célula el cadmio puede enlazarse a compuestos orgánicos azufrados como el glutathione (GSH), las fitoquelatinas (PCs) o los ácidos orgánicos, como el ácido cítrico. Otras probables moléculas responsables de la quelación del cadmio son pequeñas proteínas ricas en cisteína denominadas metalotioneínas (MTs). Los complejos Cd-compuestos orgánicos pueden ser transportados al interior de la vacuola o a otras células (Domínguez-Solís *et al.*, 2004; Clemens, 2006, citado por SHAH y NONGKYNRIH, 2007)

Las plantas recurren a una serie de mecanismos de defensa para controlar la absorción, acumulación y translocación de metales pesados peligrosos y los desintoxica excluyendo las formas iónicas libres del citoplasma. Los metales pesados pueden reemplazar elementos metálicos esenciales induciendo síntomas de deficiencia. Algunos como el Cd o Pb, inducen la formación de radicales libres (especies de oxígeno reactivo) responsables del daño a las biomoléculas, incluso al ADN (Deng *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2010, citado por ZITKA *et al.*, 2013)

Las plantas expuestas a altos niveles de cadmio reducen su fotosíntesis y en consecuencia, retrasan su crecimiento, reducen la absorción de agua y nutrientes; evidencian clorosis foliar, pardeamiento de ápices radiculares y finalmente, deviene la muerte (Yadav, 2010, citado por JIMÉNEZ, 2015)

2.3.2 Ingreso, transporte y acumulación del plomo

La materia orgánica (M.O) del suelo es el factor más importante que incrementa la biodisponibilidad del plomo (Pb). La localización del plomo en la capa superficial de la mayor parte de los perfiles del suelo está relacionada con la acumulación de la M.O del mismo. Por ello, la M.O debería ser considerada como una fuente importante de plomo en los suelos contaminados (JIN *et al.*, 2005)

Entre el 0.005 y 0.13 por ciento del plomo en la solución del suelo está disponible para las plantas. Sin embargo, la absorción de plomo varía significativamente según los rangos de concentración y las distintas formas de plomo que ocurren en los suelos. Aunque las plantas absorben plomo del suelo y lo transportan a los órganos aéreos, no todo el plomo es tomado directamente del suelo por las raíces: sino también, se retiene en la materia vegetal muerta acumulada cerca de la superficie del suelo, siendo este proceso controlado por factores del suelo y de la planta (Davies, 1995, citado por KABATA-PENDIAS, 2011)

El plomo es absorbido principalmente por los pelos radiculares y almacenado en gran porcentaje en las paredes celulares. El contenido de plomo de las plantas que crecen en áreas mineralizadas, está en general, altamente correlacionada con la concentración de plomo en el suelo; aunque esta relación difiere entre órganos de la misma planta (KABATA-PENDIAS, 2011)

La significativa acumulación del plomo en las raíces y su baja tasa de transporte hacia las partes aérea es muy limitada, pues solo el tres por ciento del plomo de las raíces se transporta a los retoños. La absorción de plomo en los tejidos radiculares es principalmente intra-celular y puede ser secuestrado en las vacuolas. El proceso responsable de la acumulación de este metal en el tejido radicular es su deposición, principalmente como pirofosfato de plomo a lo largo de las paredes celulares (Meyers *et al.*, 2008, citado por KABATA-PENDIAS, 2011)

Una completa y profunda comprensión de los procesos de absorción, transporte y acumulación de cadmio y plomo en los tricomas de las hojas, vacuolas de células de frutos y semillas de cacao; así como, la bioquímica de la desintoxicación e hipoacumulación, son aún desafíos cuya aclaración posibilitaría encontrar estrategias alternativas para fortalecer la tolerancia al estrés oxidativo causado por la toxicidad del cadmio y plomo, acompañadas de eficaces estrategias de fitorremediación.

2.4 Estudios sobre el cadmio y plomo en cacao.

La concentración de metales pesados en las plantaciones de cacao por encima de los límites máximos permisibles representa un grave problema para los agricultores y cooperativas de las principales regiones cacaoteras del país. Se reporta que la planta de cacao absorbe metales pesados del suelo y los concentra en las semillas (Augstburger *et al.*, 2000, citado por HUAMANÍ *et al.*, 2012)

Un estudio realizado en 22 plantaciones de cacao orgánico de las regiones de Huánuco y Ucayali señala que los valores promedio de cadmio y plomo disponibles en los suelos fue de 0.53 y 3.02 ppm, respectivamente. En cambio, en hojas de cacao fue de 0.21 y 0.58 ppm, respectivamente (HUAMANÍ *et al.*, 2012). Estudios de cadmio realizados en el clon CCN-51 en las provincias del Huallaga y San Martín, reportan valores promedio de cadmio en almendras de cacao de 1.15 y 1.17 ppm, respectivamente (HUAMANI y HUAUYA, 2011)

Otro estudio en cacao orgánico de la Cooperativa Naranjillo encontró valores altos de cadmio disponible en el suelo (1.82 ppm y 1.63 ppm) en las riberas de los ríos Huallaga y Tulumayo, respectivamente, y un valor promedio de 1.55 ppm de cadmio en las almendras de cacao (CÁRDENAS, 2014)

En Tingo María, un estudio de evaluación del efecto del cadmio en tres variedades de cacao: CMP-99, CMP-15 y CCN-51, reporta una mayor concentración de cadmio en el cultivar CMP-99 con diferencias estadísticas

significativas entre variedades, siendo mayor la acumulación de este metal en plántulas tratadas con 250 ppm de cadmio inoculadas como sulfato de cadmio (ACOSTA, 2013)

En las plantaciones de cacao orgánico de la República Dominicana se encontró que el cadmio y el plomo disponible del suelo representan el 33 y 11.7 por ciento del cadmio y plomo total de la planta, respectivamente; mientras que un rango de 1.74 a 11.7 por ciento fue para el plomo total. Además, se encontró 2.6 ppm de cadmio en la cascarilla comparado con 0.6 ppm en la almendra seca y 0.75 ppm en la semilla fresca de cacao (REYES y MARÍA, 2004)

Otro estudio en diferentes regiones cacaoteras del Perú reporta que en general, la concentración de metales pesados estuvo por debajo de los límites críticos, existiendo altos niveles de cadmio en las regiones de Amazonas, Piura y Tumbes. También reporta una respuesta diferencial de los clones de cacao a la acumulación de cadmio en hojas y granos de este cultivo (ARÉVALO *et al.*, 2017)

El contenido de cadmio en semillas de cacao está asociada a altos niveles de cadmio en el suelo; sin embargo, factores como: variedad, pH del suelo y disponibilidad de otros nutrientes, también afectan su absorción. Estudios hidropónicos muestran que el contenido de Zn y Fe varía con la variedad, existiendo una correlación directa entre ellos. Además, el cadmio afecta la absorción del Zn, Mn y Fe. El portainjerto de cacao también influencia la cantidad de cadmio acumulado en las hojas (CRYER y HADLEY, 2012)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Campo experimental.

3.1.1 Ubicación

Los análisis de suelos se realizaron en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María. Las muestras de suelo, hoja y fruto se colectaron del campo experimental de cacao de la Estación Tulumayo, ubicada en el distrito José Crespo y Castillo, provincia Leoncio Prado y región Huánuco.

Las coordenadas UTM del lugar de colecta son los siguientes:

Este : 0385709

Norte : 8990405

Altitud : 500 msnm.

Según la clasificación de Holdridge, esta zona de vida corresponde a un bosque muy húmedo pre-montano tropical (bmh-PMT)

3.1.2 Historia.

La plantación de cacao policlonal tenía tres años de edad; el relieve del suelo poseía pendiente muy ligera (2 %) y la plantación colindaba con otras especies frutales como: guaba (*Inga edulis* L.) y papayo (*Carica papaya* L.)

Anteriormente, en dicho suelo se instaló un semillero de papayo fertilizado con Superfosfato triple de calcio, Cloruro de potasio y Úrea, El plan de abonamiento programado y ejecutado se presenta en el Cuadro 13 (Anexo)

3.1.3 Registros meteorológicos

En el Cuadro 1, se presenta los datos de precipitación y temperatura registrados en la Estación meteorológica Tulumayo N° 000469 de tipo convencional, desde el mes de junio hasta el mes de noviembre del año 2017.

Cuadro 1. Datos meteorológicos registrados en la Estación meteorológica de Tulumayo (junio-noviembre, 2017)

Mes	Temperatura (°C)			Precipitación (mm)
	Máxima	Mínima	Media	
Junio	30.5	22.1	26.3	195.4
Julio	30.1	17.5	23.8	58.4
Agosto	32.0	20.7	26.3	111.9
Septiembre	31.6	20.2	25.9	175.4
Octubre	31.1	20.5	25.8	217.6
Noviembre	30.6	21.5	26.0	319.9
Promedio	31.0	20.4	25.7	179.8

Del Cuadro 1 se deduce que en los tres últimos meses de cosecha de cacao (junio a agosto) y los dos meses de “descanso” (septiembre y octubre), si bien hubo marcada diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas, la temperatura media se mantuvo en el rango normal para el crecimiento y desarrollo de los árboles de cacao. De modo similar sucede con la precipitación, que excepto el mes de julio, los demás meses presentan valores normales que no posibilitan la ocurrencia de estrés hídrico que limite el crecimiento y la maduración de frutos y semillas y, también, el inicio del brotamiento y crecimiento de las hojas en los meses de octubre y noviembre.

3.1.4 Materiales, herramientas y equipos

- Materiales plásticos, papel filtro, etc.
- Materiales diversos de vidrio
- Tubo muestreador
- Balanza analítica
- Estufa marca MEMMERT
- Molino eléctrico (BOSCH MKM 6003)
- Espectrofotómetro de absorción atómica (EAA)

3.1.5 Origen o procedencia del material genético

La mayoría de los clones de cacao utilizados tuvo como origen el proceso de selección-hibridación-selección realizado por el Programa de

Mejoramiento Genético del Cacao, liderado por el Ing. Luis García Carrión iniciado en el año 1995 en la UNAS-Tingo María. Con excepción del clon C-60 (selección del campo del agricultor); los demás clones poseen genealogía conocida y fueron caracterizados morfo-agronómicamente por GARCIA (2012). Estos clones y su correspondiente genealogía se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Relación de cinco clones de cacao y genealogía.

Nº	Clones	Genealogía (Pedigrí)
1	S-08	(ICS-95 x UF-296), 12
2	S-12	(ICS-1 x SCA-6), 1
3	S-23	(IMC-67 x U-68), 16
4	S-28	(ICS-39 x U-45), 5
5	C-60	Selección del campo del agricultor

3.2 Ejecución del experimento

3.2.1 Muestreo del suelo del campo experimental

En el muestreo del suelo experimental se extrajo cinco muestras de cada parcela clonal de los cuatro bloques. Para la evaluación de contenidos de cadmio y plomo, macronutrientes y micronutrientes del suelo, los muestreos del suelo se hicieron en cruz por cada planta de cada parcela clonal y en los cuatro bloques. Con este fin se usó un tubo muestreador que extrajo muestras de suelos a una profundidad de 20-25 cm, previa eliminación de hojarasca y rastros que estaban en la capa superficial (1- 3 cm) del suelo. Luego, las muestras de suelo se

codificaron, empacaron en bolsas plásticas transparentes y se llevó al Laboratorio de Suelos-UNAS para el análisis físico-químico.

3.2.2 Análisis físico-químico inicial del suelo

Los resultados del análisis físico-químico inicial de las muestras de suelo extraídas del campo, se presentan en el Cuadro 3. De este cuadro se interpreta que el suelo es de origen aluvial, de textura franco-arcillo-limoso, de pH ligeramente ácido, y con contenido medio de materia orgánica y nitrógeno total. Con contenido medio de fósforo, bajo en potasio y elevada Capacidad de intercambio catiónico, según la escala de BENZING (2001). Relativamente bajo en cadmio y muy bajo en plomo, según KABATA-PENDIAS (2011)

3.2.3 Elección de los clones de cacao

Los clones de cacao elegidos se identificaron en el campo experimental de la Estación Tulumayo. Los principales criterios de elección fueron: (a) buen potencial productivo basado en el tamaño y número de mazorcas, número de semillas y peso de semillas, (b) tolerancia a enfermedades “escoba de bruja” y “moniliasis” y (c) buen perfil organoléptico.

3.2.4 Metodología de extracción y evaluación

A. En el suelo

Las muestras de suelo se extrajeron en cruz de cada planta (clon) en evaluación, al inicio y al final del estudio.

Cuadro 3. Análisis físico-químico inicial del suelo experimental.

Parámetros Físicos y Químicos	Valor	Método
Análisis físico		
Arena	19.68%	Hidrómetro
Arcilla	37.04%	Hidrómetro
Limo	43.28%	Hidrómetro
Clase textural	Franco arcillo-limoso	Triángulo textural
Análisis químico		
pH (1:1) en agua	6.38	Potenciómetro
M.O (%)	3.2	Walkey y Black
N total (%)	0.16	% M.O x 0.045
Fósforo disponible (ppm)	13.04	Olsen modificado
Potasio disponible (ppm)	105	Ácido sulfúrico
Cd disponible (ppm)	0.29	EDTA 0.05M M pH 7
Pb disponible (ppm)	3.24	EDTA 0.05M M pH 7
Ca cambiable cmol(+)/kg	16.45	EAA
Mg cambiable cmol(+)/kg	1.28	EAA
K cambiable cmol(+)/kg	1.48	EAA
Na cambiable cmol(+)/kg	2.30	EAA
Al cambiable cmol(+)/kg		Yuan
H cambiable cmol(+)/kg		Yuan
CIC	22.42	EAA
Bases cambiables (%)	100	Ca+Mg+K+ Na/CIC x 100
Acidez cambiable (%)	0	CIC Bases cambiables
Saturación de Aluminio	0	

B. En tejidos especiales (hojas, endocarpio del fruto y semillas)

Se realizó en forma mensual durante los últimos meses de cosecha (junio-julio-agosto), brotamiento y crecimiento foliar e inicios de la floración

(octubre-noviembre). Para tal efecto, se recolectaron 30 hojas de 3 plantas (10 por planta) del tercio medio de las ramas plagiotrópicas. Este número de hojas por planta fue decidido para evitar defoliación de las plantas elegidas de los clones evaluados. Además, se recolectaron dos mazorcas por planta (clon) que una vez partidas longitudinalmente con una navaja fina se extrajeron bloques de tejido endocárpico del fruto. Las semillas extraídas manualmente, se desmucilaginaron con aserrín, se lavó, oreó y se determinó el peso fresco.

Tanto las muestras foliares, como las semillas frescas y el tejido del endocarpio del fruto fueron secados a la estufa marca MEMMERT, a 70 °C por 24 h. El procedimiento fue repetido en cada mes de evaluación por cada clon estudiado. Al final las muestras secas se molieron en un molino eléctrico marca BOSCH MKM 6003. Como las semillas frescas no fueron fermentadas, en los títulos de los cuadros, figuras y anexos no se consideran como granos o almendras, sino como semillas secas.

3.2.5 Análisis químico del tejido foliar, frutos y semillas

La determinación de cadmio y plomo total de los tejidos evaluados (hojas, endocarpio de frutos y semillas secas), se realizó mediante el proceso de digestión por vía húmeda con ácido nítrico perclórico. Para este proceso fue necesario disponer de 2 g. como peso mínimo de la muestra seca (molida finamente) por cada tejido a analizar; que en mezcla con el ácido nítrico perclórico

(4:1) y el añadido de 15 ml de HCl 0.1N, se fue digiriendo en una cocina eléctrica a una temperatura de aprox. 175°C por 1 hora y 30 minutos.

Una vez finalizado el proceso de digestión por vía húmeda de los tejidos analizados, se agitó el frasco para disolver las cenizas y se procedió a filtrar los extractos digeridos con papel filtro Whatman N° 42. El extracto filtrado se transfirió a fioles de 25 ml de capacidad y se enrasó con agua destilada. Este filtrado se leyó en el Espectrofotómetro de absorción atómica (BAZÁN, 1996).

Posteriormente, se realizaron otras diluciones, como el caso de los nutrientes secundarios (Ca, Mg, Na, K) y micronutrientes (Mn, Cu, Fe, Zn). Las diluciones realizadas fueron de 1/100, 1/1000 y 1/10000 que pudieron variar según el elemento en estudio. Para el cadmio (Cd) y plomo (Pb) no fue necesario realizar diluciones, pues la lectura se hizo de manera directa del extracto acuoso en el Espectrofotómetro de absorción atómica de llama.

3.3 Análisis estadístico.

Para el estudio de la cinética de acumulación de los metales pesados cadmio (Cd) y plomo (Pb), en hojas, frutos y semillas, los datos se visualizaron previamente en los diagramas de dispersión para encontrar el modelo matemático predictivo más ajustable. Como los datos no se ajustaban a un modelo de regresión lineal ($Y = b_0 + b_1x$), pero sí a un modelo de regresión polinómica o curvilínea ($Y = b_0 + b_1x +$

b_2x^2) de segundo grado y de tipo parabólica, se eligió esta última. Los datos fueron procesados utilizando una Hoja MS-Excel.

En cambio, para los estudios de asociación entre el cadmio, plomo y micronutrientes a nivel de semillas, se utilizó el análisis estadístico bivariado a través de la correlación de Pearson (r), cuya significación estadística fue determinada según las Tablas estadísticas para Investigación Biológica, Agrícola y Médica de Fisher y Yates (1957), citado por STEEL y TORRIE (1980)

Para el estudio de la relación de clones de cacao con metales pesados (Cd, Pb) y micronutrientes en las semillas, se utilizó el método estadístico multivariado: análisis de componentes principales (ACP) basado en el análisis de covariancia y la interpretación mediante el análisis biplot. Finalmente, para el comparativo de resultados del análisis químico (inicial y final) del suelo, se utilizaron estadísticos univariados de tendencia central y dispersión.

En todos los análisis estadísticos: univariado, bivariado y multivariado, se utilizó el software estadístico PAST (2001), vers. 2.17c.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Cinética de la acumulación de cadmio en hojas, frutos y semillas.

En el Cuadro 4, Figura 1, se muestran los resultados y la curva de regresión polinómica de acumulación del cadmio en hojas de cinco clones de cacao evaluados durante seis meses del año 2017 en la Estación Tulumayo.

Cuadro 4. Acumulación de cadmio (ppm) en hojas de cinco clones de cacao.

Clon	Cadmio (ppm)						Promedio (ppm)
	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	
S – 12	2.688	0.738	0.813	0.763	0.838	0.988	1.138
S – 23	3.938	0.875	0.800	1.450	0.800	0.688	1.425
C – 60	2.813	0.450	0.413	0.625	0.813	0.763	0.979
S – 08	3.438	0.750	0.725	0.850	0.550	0.863	1.196
S – 28	3.100	1.563	1.625	1.325	0.563	2.038	1.702
Promedio	3.195	0.875	0.875	1.003	0.713	1.068	1.288

De la Figura 1, inferimos que el 78.9 % de la variación del contenido de cadmio acumulado en las hojas es explicado por el tiempo (meses) de extracción del cadmio disponible en la solución suelo por el flujo de masas u ósmosis.

En el Cuadro 4, Figura 2, observamos que la acumulación mensual de cadmio en hojas, osciló de 0.713 ppm (octubre) a 3.195 ppm (junio), y todos los clones sin excepción, en el mes de junio, el cadmio se ubicó en el nivel más alto de acumulación disminuyendo drásticamente en julio (época no lluviosa) y

estabilizándose hasta octubre y luego incrementar la acumulación en noviembre cuando la planta de cacao reinicia su crecimiento y floración estimulada por la mayor frecuencia e intensidad de las lluvias que favorece una rápida absorción del cadmio en la solución del suelo por la mayor concentración y disponibilidad debido al flujo de masas que lo transportan e inmovilizan en las vacuolas celulares. Los clones C-60, S-12 y S-08 se comportarían como hipoacumuladores; mientras que los clones S-28 y S-23, como ligeramente hipoacumuladores de cadmio a nivel de hojas de cacao.

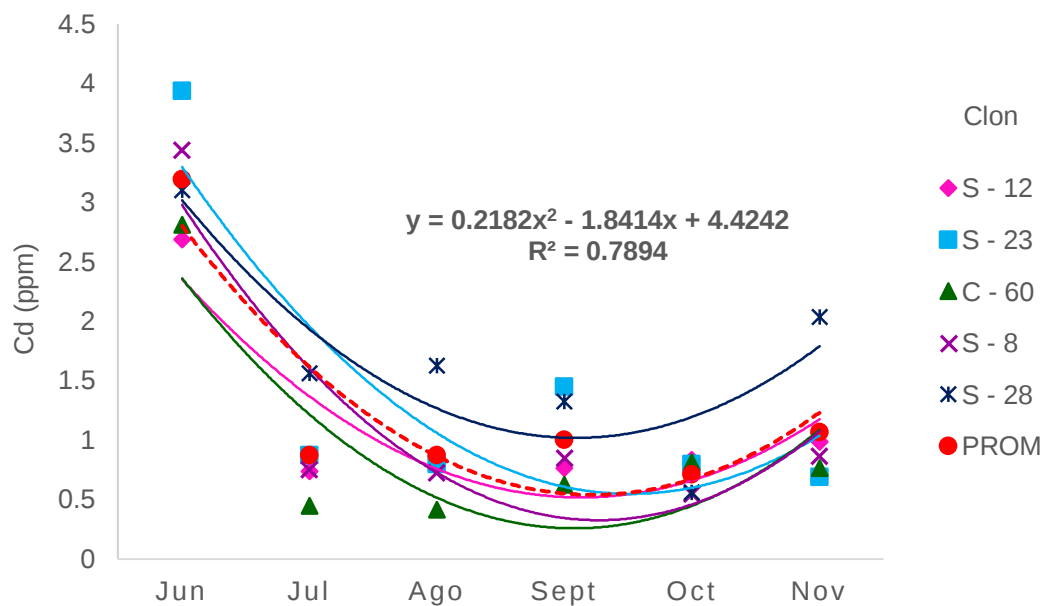


Figura 1. Curva de regresión polinómica de acumulación de cadmio en hojas de cinco clones de cacao.

Aunque la concentración del cadmio en junio del 2017 fue 3.7 veces el contenido promedio del periodo julio-octubre (0.866 ppm), las hojas de las plantas

de cacao no mostraron deficiencia de algún macronutriente (P) y/o micronutriente (Fe), o evidencia de fitotoxicidad que se expresa en clorosis, enrollamiento y necrosis foliar; reducción del crecimiento, daño a la maquinaria fotosintética, especialmente los fotosistemas PS-I y PS-II y reducción de la síntesis de clorofila (Foy *et al.*, 1978, citado por SHARMA y SACHDEVA, 2015)

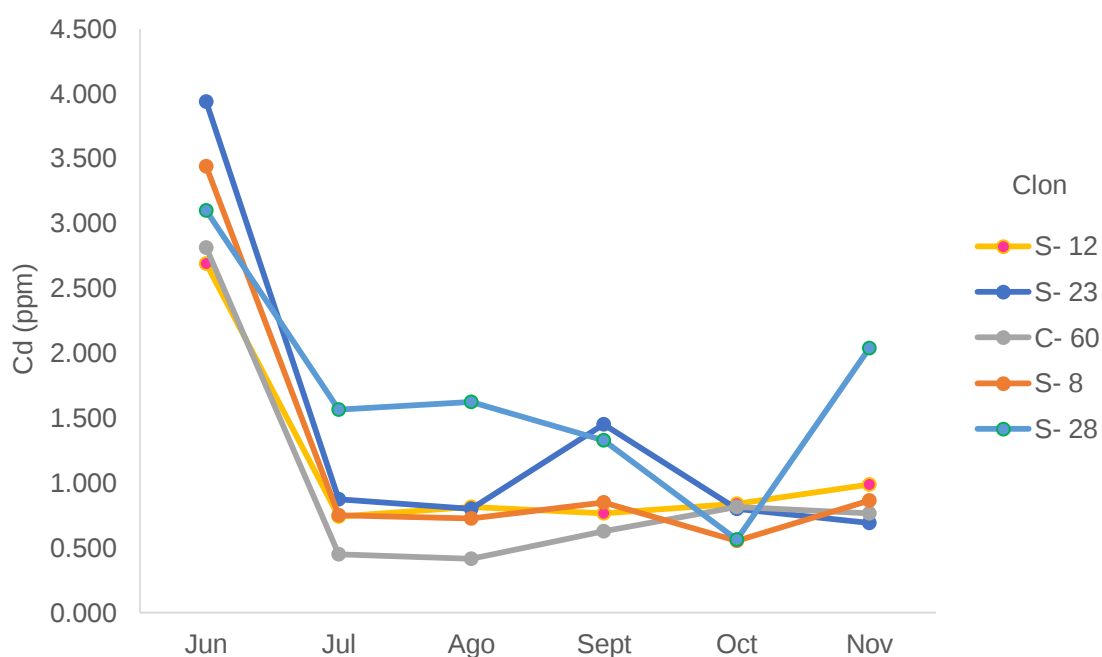


Figura 2. Cinética de acumulación de cadmio en las hojas de cinco clones de cacao.

La tolerancia de la planta de cacao al cadmio se puede atribuir a un proceso de adaptación donde estarían involucrados mecanismos de secuestro por ácidos orgánicos (cítrico, málico); mecanismos de detoxificación de parte de las fitoquelatinas y metalotioneinas, y su inmovilización en las vacuolas celulares (Domínguez-Solís *et al.*, 2004, citado por RODRIGUEZ-SERRANO *et al.*, 2008)

La planta por instinto de sobrevivencia necesita prepararse metabólicamente para asegurar un normal crecimiento y desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos (frutos y semillas). Aunque el cadmio es un metal muy móvil, su rápido transporte de las raíces hacia los órganos aéreos, principalmente brotes y hojas, necesita ligarse a proteínas transportadoras. Es posible que el Cd^{+2} use las mismas proteínas transportadoras del Ca^{+2} (LCT1) o de los transportadores ZIP del Zn^{+2} o Fe^{+2} (GUERINOT, 2000), u otras, pero para poder ingresar a la célula y realizar alguna (s) función (s) metabólica específicas. Sin embargo, se ha reportado que el cadmio promueve la síntesis de los aminoácidos: cisteína y metionina que constituyen las proteínas. Las metalotioneinas, proteínas ricas en cisteína, son responsables de la quelación del cadmio y actuarían como mecanismos de autorregulación de la acumulación del mismo (PIETRINI *et al.*, 2016)

El cadmio, además de acumularse en las vacuolas celulares y tricomas foliares (ZHI *et al.*, 2006), desempeña funciones de almacén, transporte y otras aún no conocidas liberándose por lixiviación foliar (KABATA-PENDIAS, 2011) y alojarse en las vacuolas del tejido caulinar (sitios de acumulación transitorios), que con el estímulo de las lluvias se desinmovilizaría y transportaría rápidamente a los sitios de crecimiento vegetativo (meristemas), reproductivos, o ambos, participando como un co-factor enzimático de alguna ruta metabólica secundaria específica.

Si bien VERBRUGGEN *et al.* (2009), reporta que las rutas metabólicas del cadmio y su acumulación en las plantas no son bien comprendidas, KABATA-PENDIAS (2011) propone una hipótesis de respuesta de las plantas al estrés por deficiencia y toxicidad a elementos trazas esenciales y no esenciales, donde la curva para elementos esenciales es similar a la curva del cadmio obtenida en este estudio. Si en el futuro cercano se llegara a demostrar su participación en alguna ruta metabólica secundaria, v.g., biosíntesis de hormonas, polifenoles (flavonoides), fitoquelatinas y/o proteínas antioxidantes, el cadmio dejaría de ser un metal no esencial para convertirse en metal esencial, como el Zn, Fe, Cu, Mn, Si, entre otros.

Se ha reportado diferentes respuestas entre cultivares (clones) de cacao a la acumulación del cadmio en hojas y semillas (AREVALO *et al.*, 2015). También el portainjerto (patrón) de cacao influencia la cantidad de cadmio que se acumula en las hojas (CRYER y HADLEY, 2012). Aunque HUAMANI *et al.* (2012) reporta una concentración media de cadmio en hojas de 0.21 y 0.58 ppm en plantaciones de cacao de Huánuco; nuestros valores son muy superiores ubicándose en el rango de 0-21 ppm reportado por IZQUIERDO (1988) para hojas de cacao de Barlovento (Venezuela). Las diferencias en los resultados encontrados se pueden atribuir a la unidad fisiográfica y el tipo de suelo, el estado de desarrollo de las hojas, la época y/o fase fenológica, el genotipo (cultivar), la edad, etc. También se puede ser atribuir a la variación en el pH del suelo, la clase textural, el contenido de M.O y la concentración del cadmio en el suelo (BUSINELLI *et al.*, 2009; ALLOWAY, 2013)

En el Cuadro 5, Figura 3, se muestra los resultados y la curva de regresión polinómica de acumulación del cadmio en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacaos evaluados durante seis meses del año 2017, en la Estación de Tulumayo. De la Figura 3, se infiere que el 91.2 % de la variación del cadmio acumulado en el endocarpio del fruto del cacao se explica por el tiempo (meses) de extracción del cadmio disponible en la solución del suelo.

Cuadro 5. Acumulación de cadmio (ppm) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.

Clon	Cadmio (ppm)						Promedio (ppm)
	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	
S - 12	0.750	0.300	0.300	0.925	0.325	1.025	0.604
S - 23	0.950	1.063	0.563	0.625	0.500	0.988	0.781
C - 60	1.175	0.875	0.238	0.613	0.500	0.925	0.721
S - 08	1.613	0.163	0.750	0.275	0.363	1.325	0.748
S - 28	1.463	0.825	0.538	0.350	0.600	0.400	0.696
Promedio	1.190	0.645	0.478	0.558	0.458	0.933	0.710

Del Cuadro 5 y Figura 4, observamos que la acumulación mensual de cadmio en el endocarpio del fruto de cacao osciló de 0.458 ppm (octubre) a 1.190 ppm (junio), y que al igual que en hojas, todos los clones sin excepción, en junio hubo mayor acumulación de cadmio, reduciéndose significativamente en julio (época no lluviosa) y estabilizándose hasta octubre y reiniciar su acumulación en noviembre cuando la planta de cacao reinicia su crecimiento y floración. La mayor frecuencia e intensidad de las lluvias estimularían una mayor absorción y transporte de una fracción de cadmio absorbido e inmovilizarlo en el endocarpio del fruto.

El clon S-12, se comportaría como hipoacumulador mientras que los clones S-28, C-60 y S-08, como ligeros hipoacumuladores de cadmio. Aunque esta curva de acumulación de cadmio es similar al de hojas, las acumulaciones mensuales en el endocarpio del fruto, son significativamente menores.

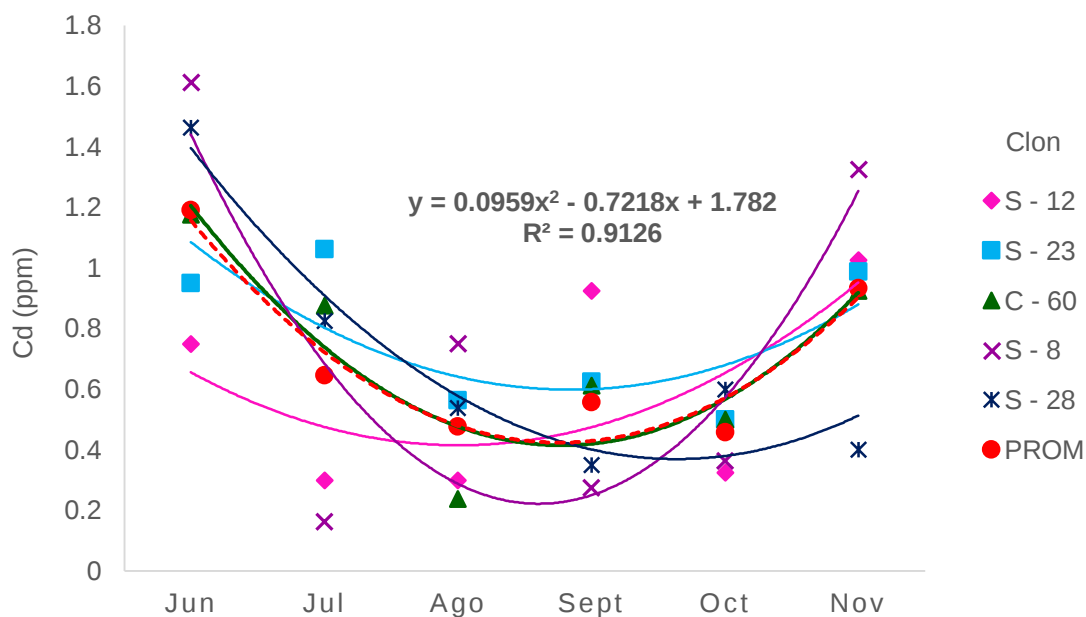


Figura 3. Curva de regresión polinómica de acumulación de cadmio en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.

En la Figura 4 los picos y declives de acumulación del cadmio que son evidentes se explicaría por las inmovilizaciones y des-inmovilizaciones de este metal ante el estímulo de las precipitaciones esporádicas mensuales en la Estación Tulumayo. La removilización por el floema y el redireccionamiento a los sitios de acumulación transitorios causaría disminución de iones Cd^{+2} debido a la inmovilización (secuestro) por las fitoquelatinas, v.g., el glutatión reducido (GSH)

que es útil para mantener el balance redox celular (NAZAR *et al.*, 2012), desencadenando respuestas diferenciales de clones de cacao a la acumulación de cadmio. También estas variaciones pueden ser explicados por el “efecto dilución” y/o “efecto concentración” debido al incremento de la materia seca o biomasa (SARWAR *et al.*, 2010; CIKILI *et al.*, 2016)

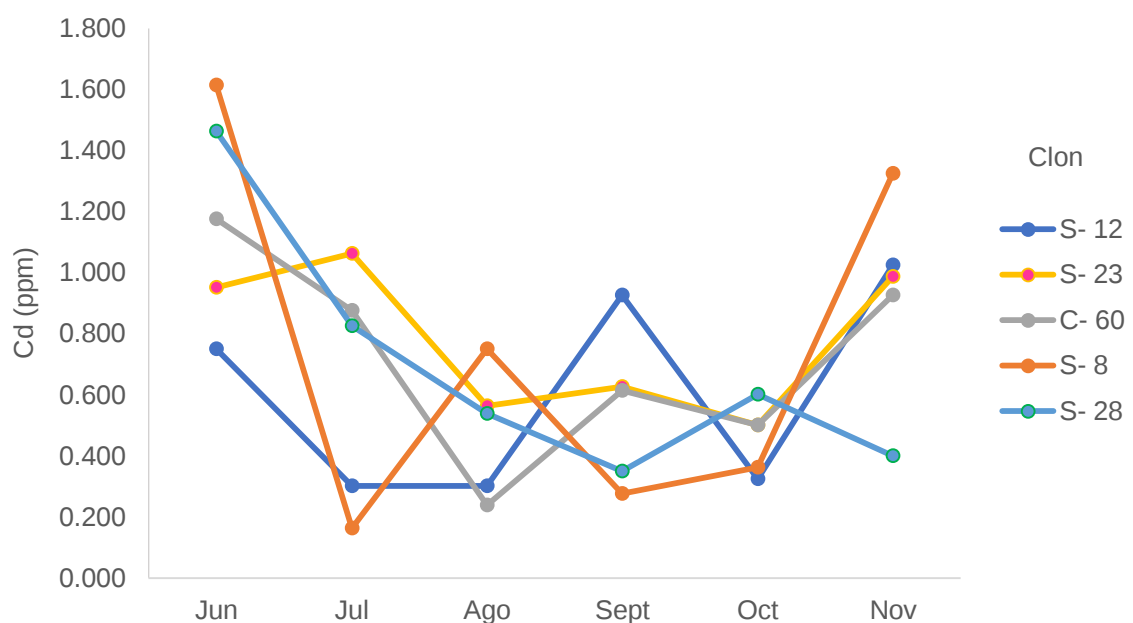


Figura 4. Cinética de acumulación de cadmio en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.

Son escasos los reportes que evidencian acumulación de cadmio en el endocarpio del fruto (KABATA-PENDIAS, 2011); mucho menos, respuestas diferenciales entre clones de cacao. En esta capa interna rica en taninos (polifenoles) que está en contacto directo con el mucílago y la placenta de las

semillas, el cadmio se acumularía más comparado al mesocarpio y epicarpio del fruto de cacao posiblemente por su afinidad con las proteínas y lípidos.

En el Cuadro 6, Figura 5, se muestran los resultados y la curva de regresión polinómica de acumulación del cadmio en semillas de cinco clones de cacao durante seis meses del año 2017 en la Estación Tulumayo. De la Figura 5, inferimos que el 74.2 % de la variación del contenido de cadmio acumulado en las semillas es explicado por el tiempo (meses) de extracción del cadmio disponible en la solución suelo por flujo de masas u ósmosis.

Cuadro 6. Acumulación de cadmio (ppm) en semillas de cinco clones de cacao.

Clon	Cadmio (ppm)						Promedio (ppm)
	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	
S – 12	1.875	0.450	0.775	0.713	0.875	1.050	0.956
S – 23	2.538	0.488	0.788	0.913	0.713	1.413	1.142
C – 60	1.400	0.738	0.575	0.738	0.725	0.713	0.815
S – 08	1.213	0.700	0.400	0.563	0.513	0.513	0.650
S – 28	1.573	0.713	0.450	0.863	0.938	0.900	0.906
Promedio	1.720	0.618	0.598	0.758	0.753	0.918	0.894

La absorción de cadmio y compuestos inorgánicos de la solución suelo, su transporte por el xilema, la biosíntesis de metabolitos secundarios e inmovilización en sitios de acumulación transitorios, le seguiría la desinmovilización y transporte por el floema en época lluviosa (noviembre-marzo) y en menor intensidad en época no lluviosa (abril-junio) cuando el suelo tiene el micelio coloidal seco.

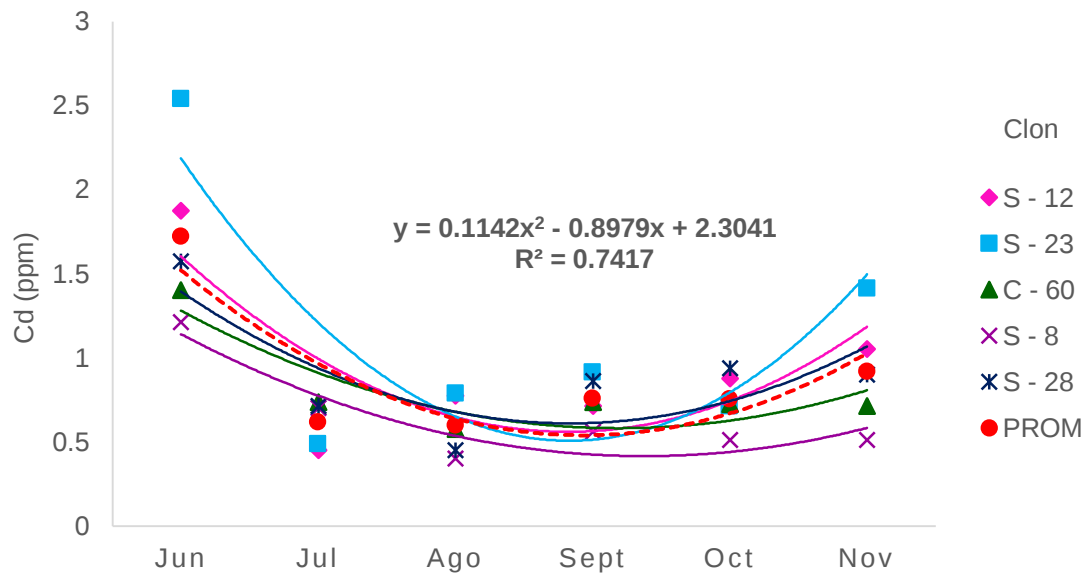


Figura 5. Curva de regresión polinómica de acumulación de cadmio en semillas de cinco clones de cacao.

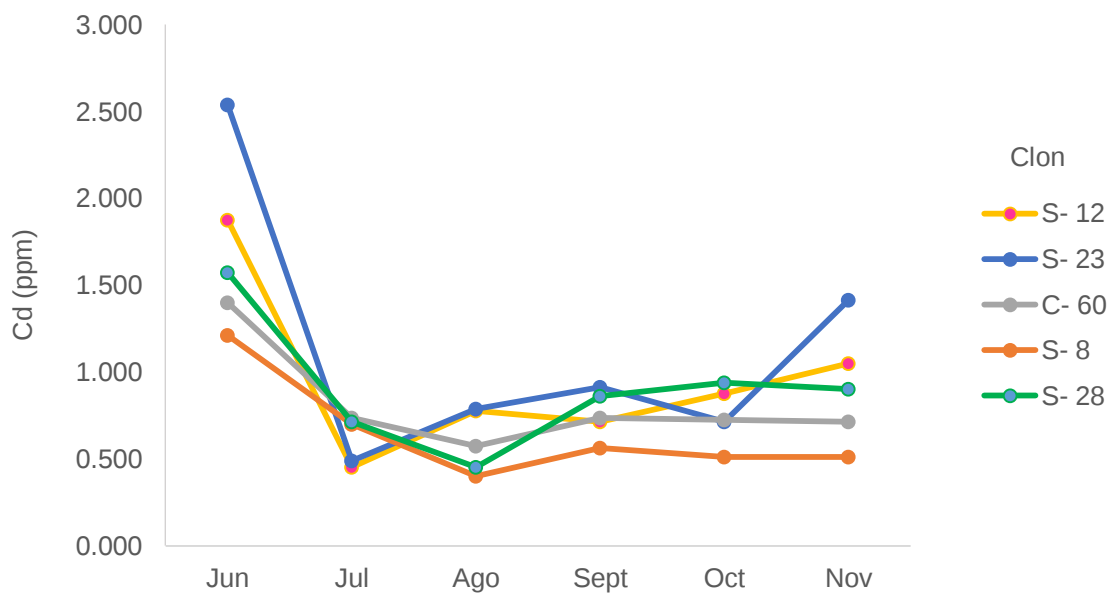


Figura 6. Cinética de acumulación del cadmio en semillas de cinco clones de cacao.

PIETRINI *et al.* (2015) reportan una respuesta diferencial en la reducción de crecimiento (30 y 50 por ciento) en dos genotipos de eucalipto con mayor acumulación de cadmio en las raíces y menor cantidad en el tallo. La concentración de cadmio se distribuye principalmente en hojas y en menor concentración en los granos y en el suelo (RAMBATAHAL *et al.*, 2016)

Si bien CÁRDENAS (2014), reporta un promedio de 1.55 ppm de cadmio en las almendras de cacao y los clones S-08 y C-60 acumulan 0.65 ppm y 0.85 ppm, respectivamente, entonces podríamos concluir que éstos clones serían hipoacumuladores de cadmio a nivel de semillas de cacao.

4.2 Cinética de acumulación de plomo en hojas, frutos y semillas

En el Cuadro 7, Figura 7, se muestran los resultados y la curva de regresión polinómica de acumulación del plomo en hojas de cinco clones de cacao evaluados durante seis meses del año 2017 en la Estación Tulumayo.

Cuadro 7. Acumulación de plomo (ppm) en hojas de cinco clones de cacao.

Clon	Plomo (ppm)						Promedio (ppm)
	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	
S - 12	15.588	5.700	2.975	2.875	2.838	8.763	6.456
S - 23	13.263	4.813	2.563	2.575	2.088	5.188	5.081
C - 60	13.013	4.725	1.913	3.088	3.275	4.725	5.123
S - 08	14.338	2.713	3.038	3.238	2.925	3.213	4.910
S - 28	15.075	6.388	6.113	3.663	3.088	5.713	6.673
Promedio	14.255	4.868	3.320	3.088	2.843	5.520	5.649

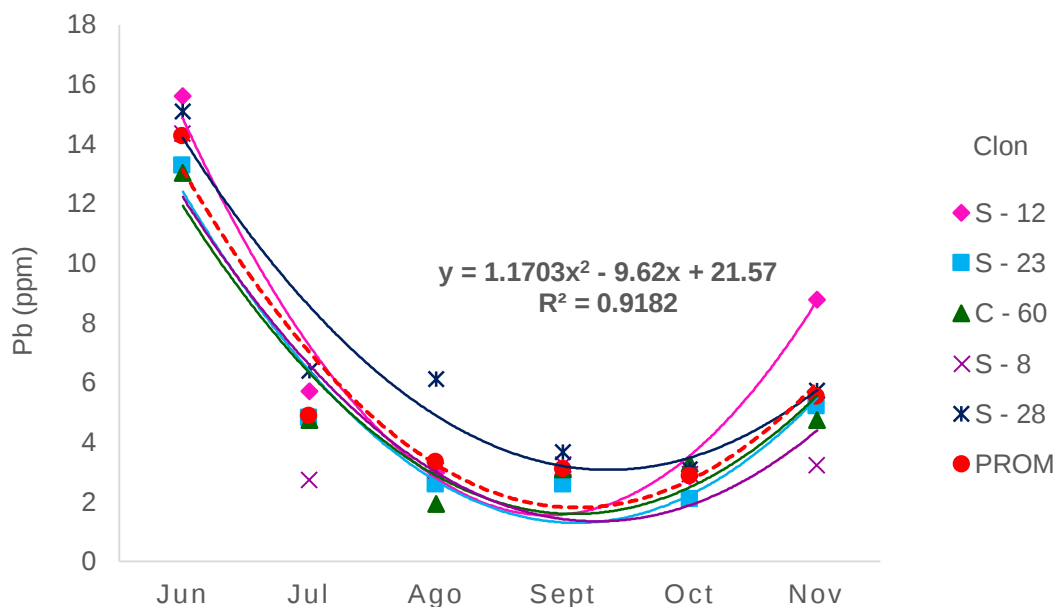


Figura 7. Curva de regresión polinómica de acumulación del plomo en hojas de cinco clones de cacao.

De la Figura 7, se infiere que el 91.8 % de la variación del plomo acumulado en las hojas del cacao se explica por el tiempo (meses) de extracción de plomo disponible en la solución del suelo.

Del Cuadro 7 y Figura 8, se observa que la acumulación mensual de plomo en las hojas osciló de 2.843 ppm (octubre) a 14.255 ppm (junio) y en el mes de junio, en todos los clones sin excepción, el plomo se ubicó en el nivel más alto de acumulación reduciéndose significativamente en julio (época no lluviosa) estabilizándose hasta octubre y luego incrementarse en noviembre cuando la planta de cacao reinicia su crecimiento y floración por la mayor frecuencia e intensidad de

las lluvias que estimulan una mayor absorción de plomo disponible en la solución del suelo, el transporte e inmovilización en las hojas.

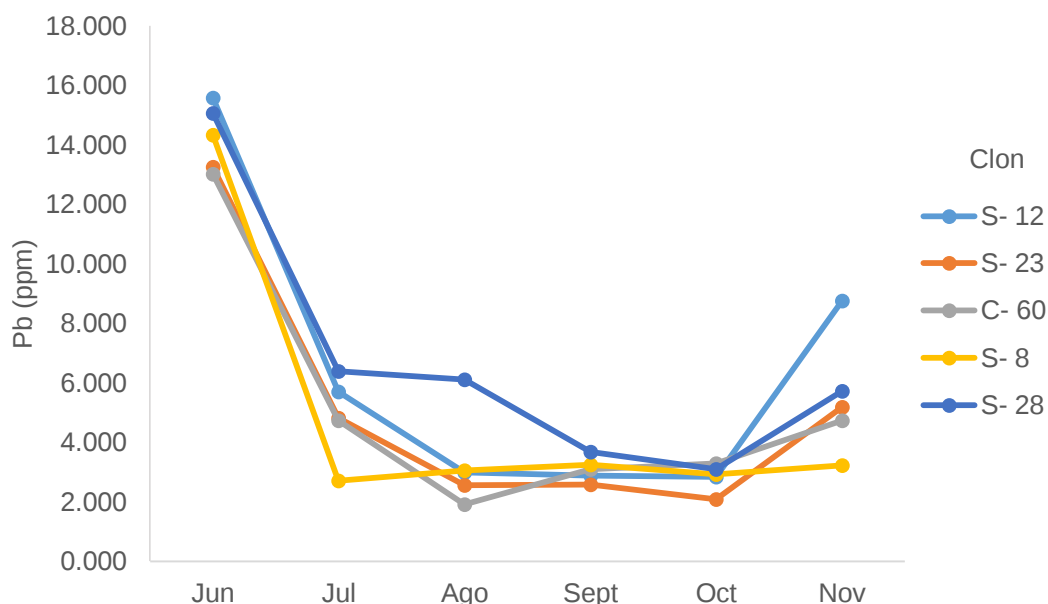


Figura 8. Cinética de acumulación del plomo en hojas de cinco clones de cacao.

Cabe señalar que, aunque el plomo presenta una elevada concentración (14.255 ppm) en el mes de junio, ésta se redujo y estabilizó en los demás meses a una concentración muy baja. Se ha reportado que el plomo de la parte aérea está correlacionada con la concentración de plomo en el suelo, siendo la materia orgánica una fuente importante de plomo en los suelos contaminados (JIN *et al.*, 2005)

Aunque las plantas absorben este metal del suelo y lo transportan a los órganos aéreos, no todo el plomo es tomado directamente del suelo por las raíces,

sino que también se retiene en la materia vegetal muerta (hojarasca) acumulada en la superficie del suelo (Davies, 1995, citado por KABATA-PENDIAS, 2011)

Mientras que el tres por ciento del plomo se transporta de las raíces a la parte aérea, la acumulación en el tejido radicular se deposita como pirofosfato-Pb en la pared celular (Meyers *et al.*, 2008, citado por KABATA-PENDIAS, 2011). En Thailandia y en hojas de té se reporta una concentración de Pb > 20 mg kg⁻¹ (Nookabkaew *et al.*, 2006, citado por KABATA-PENDIAS, 2011).

A pesar que el plomo es considerado un metal no esencial al igual que el cadmio; su similitud cinética de acumulación con el cadmio en las hojas, permite inferir que el plomo además de su rol estructural desempeñaría un funcional en el metabolismo primario y/o secundario del cacao. Las paredes celulares de las raíces donde se deposita como pirofosfato-Pb pueden servir como fuente de ácido fosfórico necesario para la biosíntesis del armazón del ADN, cuya replicación y traducción son fundamentales en el proceso de multiplicación celular del cual depende el crecimiento y desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos de las plantas; así como, la biosíntesis de la Ribulosa, 1,5 difosfato carboxilasa-oxidasa (Rubisco), una enzima clave para la fotosíntesis, entre otros.

Si tomando como referencia a Holmgren *et al.* (1993), citado por JONES *et al.* (2001) que determinaron una media geométrica de 10.4 ppm para plomo basado en 2,771 muestras de suelos de USA, y si asumimos que está correlacionada con la parte aérea, concluiremos que todos los clones serían hipoacumuladores,

entonces los clones S-08 y S-23 con 4.910 ppm y 5.081 ppm, respectivamente, serían de baja acumulación de plomo en las hojas de cacao.

En el Cuadro 8, Figura 9, se muestran los resultados y la curva de regresión polinómica de acumulación de plomo en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao evaluados durante seis meses en la Estación de Tulumayo. De la Figura 9, deducimos que el 72.9 % de la variación del plomo acumulado en el endocarpio del fruto del cacao se explica por el tiempo (meses) de extracción del plomo disponible en la solución del suelo, por el flujo de masas y ósmosis.

Cuadro 8. Acumulación de plomo (ppm) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.

Clon	Plomo (ppm)						Promedio (ppm)
	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	
S - 12	9.100	1.875	1.975	4.550	3.388	4.475	4.227
S - 23	9.350	3.663	2.813	4.150	3.613	3.988	4.596
C - 60	10.763	2.725	1.888	3.700	3.538	4.538	4.525
S - 08	11.225	2.350	2.075	2.538	3.288	4.038	4.252
S - 28	9.038	2.963	2.288	3.038	3.563	3.525	4.069
Promedio	9.895	2.715	2.208	3.595	3.478	4.113	4.336

Del Cuadro 8 y Figura 10, observamos que la acumulación mensual de plomo osciló de 2.21 ppm (agosto) a 9.90 ppm (junio), y todos los clones sin excepción, en junio, el plomo se ubicó en el más alto nivel de acumulación reduciéndose significativamente en julio (época no lluviosa) y estabilizándose hasta octubre y luego incrementar en noviembre (época lluviosa) cuando la planta reinicia su

brotamiento y floración por la mayor frecuencia e intensidad de las lluvias que estimularían una mayor absorción, transporte y acumulación del plomo en el endocarpio del fruto del cacao.

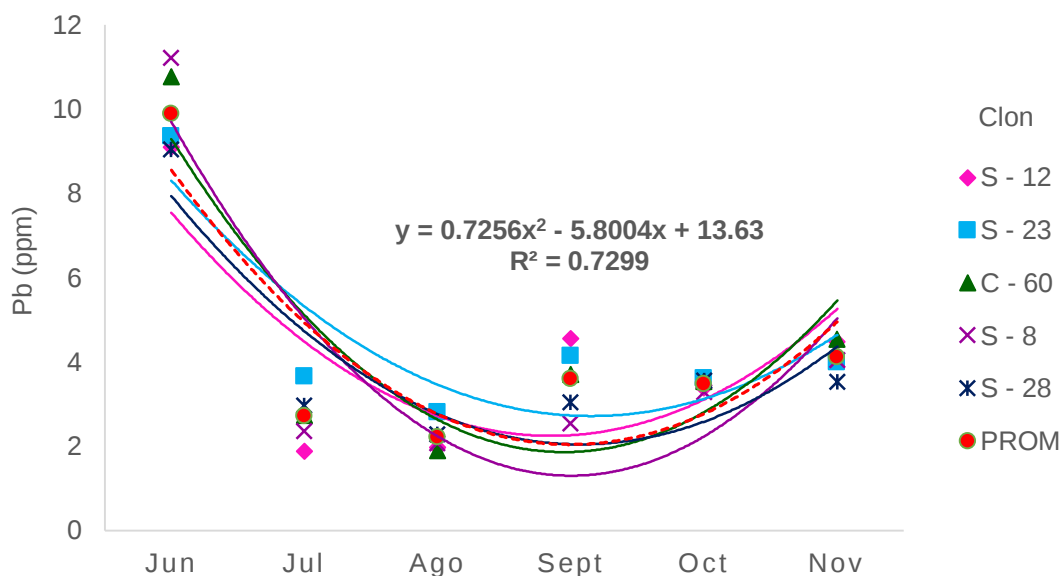


Figura 9. Curva de regresión polinómica de acumulación del plomo en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.

Si recurrimos a Holmgren *et al.* (1993), citado por JONES (2001), que establecieron una media geométrica de 10.4 ppm para el plomo de 2,771 muestras de suelos en USA, y si asumimos que se correlaciona con la parte aérea, podemos decir que aquellos clones con niveles de plomo inferiores a 5 ppm, serían considerados de baja acumulación (hipoacumuladores) a nivel del endocarpio del fruto del cacao.

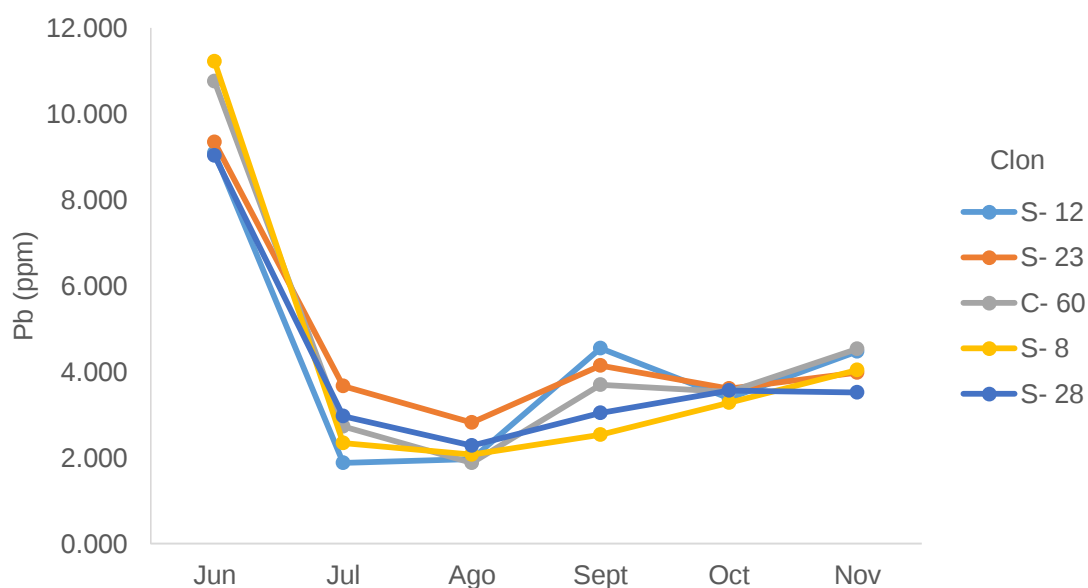


Figura 10. Cinética de la acumulación de plomo en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao.

En el Cuadro 9, Figura 11, se muestran los resultados y la regresión polinómica de acumulación de plomo en semillas de cinco clones de cacao durante seis meses de evaluación en la Estación de Tulumayo. De la Figura 11, se infiere que el 65.9 % de la variación del plomo acumulado en las semillas del cacao se explica por el tiempo (meses) de extracción del plomo disponible en la solución del suelo.

El rango de variación del plomo en las semillas oscila de 2.35 ppm (agosto) a 6.24 ppm (junio) y todos los clones sin excepción, en junio, el plomo estuvo en el nivel más alto de acumulación, luego se redujo y se mantuvo hasta noviembre (inicio de lluvias) donde la planta reinicia su crecimiento y floración por la mayor

frecuencia e intensidad de las precipitaciones que estimulan su absorción de la solución suelo, el transporte e inmovilización del plomo en las semillas del cacao.

Cuadro 9. Acumulación de plomo (ppm) en las semillas de cinco clones de cacao.

Clon	Plomo (ppm)						Promedio (ppm)
	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	
S - 12	5.950	2.125	2.650	2.600	3.313	2.900	3.256
S - 23	7.188	2.000	2.325	2.875	3.063	3.488	3.490
C - 60	6.313	2.713	2.413	3.775	3.763	2.975	3.658
S - 08	6.088	2.363	1.550	3.038	3.163	3.713	3.319
S - 28	5.675	2.763	2.825	2.850	3.750	4.038	3.650
Promedio	6.244	2.393	2.353	3.028	3.410	3.423	3.476

Estos resultados ponen en evidencia que la acumulación mensual de plomo en las semillas es menor que el endocarpio del fruto y mucho menor que en hojas. La diferencia entre órganos de una misma planta también ha sido reportada por KABATA-PENDIAS (2011)

Si otra vez lo comparamos con la media geométrica de 10.4 ppm para plomo reportado por Holmgren *et al.* (1993), citado por JONES (2001), y asumimos que se correlaciona con la parte aérea, podríamos inferir que todos estos clones serían de baja acumulación (hipoacumuladores) ya que los niveles de plomo están por debajo de 4 ppm a nivel de semillas de cacao. Más adelante se discutirá sobre los límites máximos permisibles para el plomo en los chocolates.

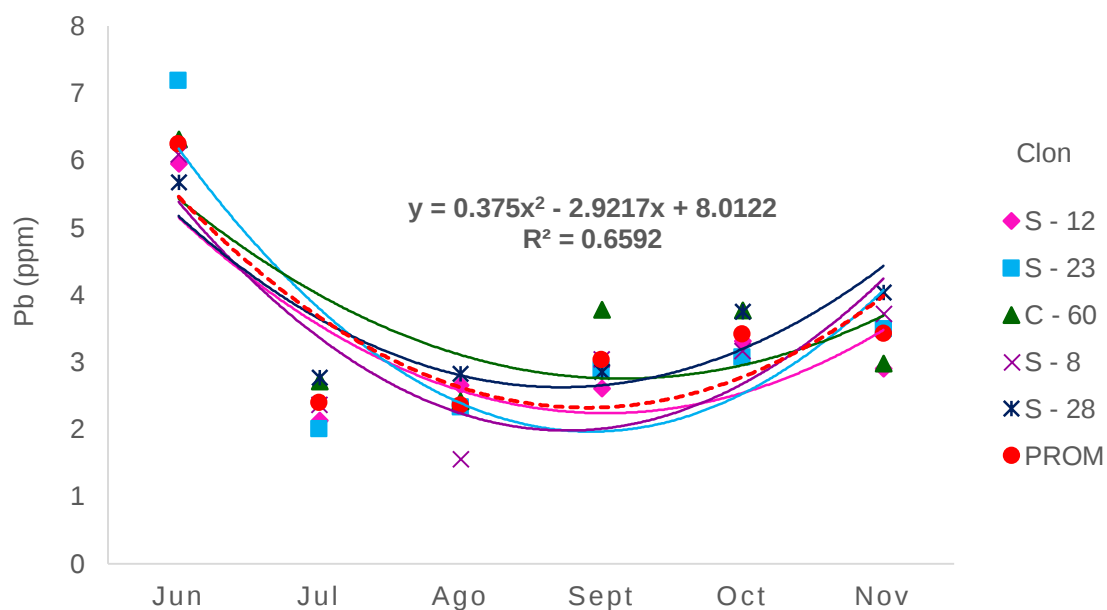


Figura 11. Curva de regresión polinómica de acumulación del plomo en las semillas de cinco clones de cacao.

Una completa y profunda comprensión de los procesos de absorción, transporte y acumulación de cadmio y plomo en los tricomas de las hojas, tallo, vacuolas celulares de frutos y semillas de cacao; así como, las rutas bioquímicas de desintoxicación e hipoacumulación, son desafíos cuya comprensión y aplicación permitiría mejorar la tolerancia de la planta al estrés oxidativo causado por la toxicidad del cadmio y plomo, y el uso de eficaces estrategias de fitorremediación.

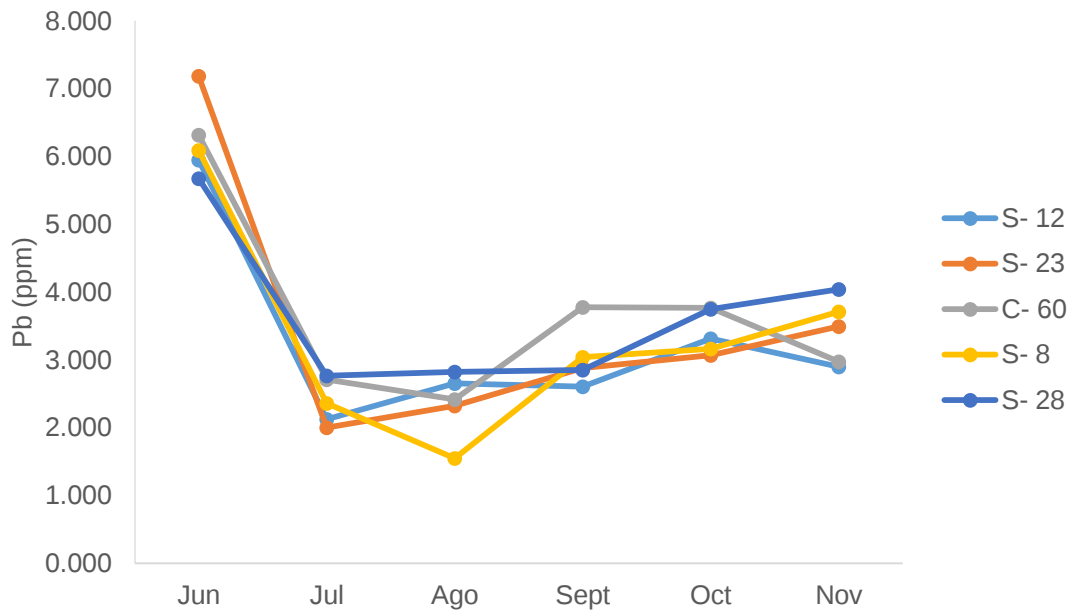


Figura 12. Cinética de acumulación de plomo en las semillas de cinco clones de cacao.

4.3 Interacción entre el Cd, Pb y micronutrientes en las semillas

En el Cuadro 10, se muestra los contenidos promedios de los metales pesados no esenciales (cadmio y plomo) y esenciales (Zn, Fe, Cu y Mn) en las semillas de cacao.

Aunque no existen reportes de niveles críticos, adecuados y tóxicos de cadmio a nivel de semillas de cacao, pero sí a nivel de hojas, la interpretación se hizo de acuerdo a los rangos reportados por investigadores de cacao y de otras especies vegetales.

Cuadro 10. Contenidos promedios (ppm) de metales pesados no esenciales (Cd, Pb) y esenciales (Zn, Fe, Cu y Mn) en las semillas de cinco clones de cacao.

Clon	Metales no esenciales (ppm)		Metales esenciales (ppm)			
	Cd	Pb	Zn	Fe	Cu	Mn
S - 12	0.960	3.260	51.290	415.080	26.230	29.970
S - 23	1.140	3.490	51.770	421.070	29.150	31.860
C - 60	0.820	3.660	52.130	412.250	31.970	26.540
S - 08	0.650	3.320	54.000	421.590	32.740	29.000
S - 28	0.910	3.650	53.710	423.330	34.190	37.290
Promedio	0.900	3.480	52.580	418.660	30.850	30.930

El contenido promedio del Fe (418.66 ppm), excede al rango de concentración adecuado (50-250 ppm) para tejidos foliares (JONES y OLSON-RUTZ, 2016) y que podría implicar el inicio de un proceso fitotóxico a nivel de los cotiledones y embrión de la semilla. Este alto valor puede explicarse por el “efecto de concentración” cuando existe exceso de un elemento en un tejido u órgano; de allí que es imprescindible realizar diluciones específicas que permitan realizar lecturas que puedan ser leídas dentro de la curva de calibración del espectrómetro de absorción atómica.

AIKPOKPODION (2010), en Nigeria y para cacao reporta concentraciones superiores de Fe y más bajas para el Mn y Zn a pesar de que el pH del suelo era igual a 6.5, atribuyéndole al origen del suelo. En otras especies vegetales, VOSS (1998), ha reportado un rango de suficiencia (adecuado) para el Fe de 11-300 ppm en trigo, y 51-350 ppm en soya. De modo similar, el valor promedio del Cu con

30.85 ppm estaría superando el rango adecuado (5-20 ppm) para tejidos foliares de varias especies vegetales lo cual podría causar ligera toxicidad; sin embargo, se han reportado rangos adecuados para Cu en hojas de tomate de 3 - 40 ppm y en hojas de algodón de 11-50 ppm (JONES y OLSON-RUTZ, 2016). Cuando se estudiaron diversos tratamientos (materiales orgánicos) incorporados al suelo, se encontró que los rastrojos de frutos de cacao fue el tratamiento más efectivo en adsorber (retener) el Cu y el Zn (OLAYINKA *et al.*, 2011).

Mientras que el Zn con 52.58 ppm está dentro del rango adecuado (50-70 ppm), según MALAVOLTA *et al.* (1997), un valor mayor de 30 ppm para hojas de cacao ha sido reportado por FAHMY (1977), y un rango normal de 25-150 ppm, para varios cultivos (JONES y OLSON-RUTZ, 2016).

Con relación al Mn, el valor promedio 30.93 ppm está muy por debajo del rango adecuado (150-200 ppm) para hojas de cacao (MALAVOLTA *et al.* 1997), pero sí en el rango de 25-200 ppm para el manzano (JONES, 2001) y de 30-200 ppm para la papa (VOSS, 1998)

Finalmente, para los metales pesados (cadmio y plomo), el promedio general de cadmio (0.90 ppm) en las semillas secas está muy por debajo del límite máximo permisible (0.80 ppm para chocolates con sólidos de cacao superiores o igual al 50%), pues un chocolate con 100 % de licor de cacao, la concentración del cadmio sería equivalente a 1.60 ppm de cadmio contenido en las semillas del cacao. Si esto es correcto, entonces todos los clones evaluados podrían ser usados para

elaborar chocolates con 50% de licor de cacao; destacando los clones S-08 y C-60, con 0.65 y 0.82 ppm de cadmio, respectivamente, que serían clasificados como los mejores clones hipoacumuladores de cadmio. Las marcadas diferencias en la acumulación de cadmio se atribuiría a la capacidad *per se* de los clones de cacao para absorber y transportar el cadmio del suelo y acumular en los órganos aéreos según sus requerimientos diferenciales en los procesos metabólicos que podrían estar involucrados.

En el caso del plomo, aunque USA y la UE, no tienen establecidos límites máximos permisibles; Brasil, Sudáfrica y Guatemala, han establecido rangos de 0.5 - 2 mg kg⁻¹ para chocolates con sólidos de cacao superiores o igual al 50%; por lo tanto, la concentración de plomo en un chocolate con 100% de licor de cacao sería equivalente al rango de 1- 4 mg kg⁻¹ en las semillas de cacao. Como conclusión, los cinco clones de cacao no sobrepasan el límite superior establecido de 4 mg kg⁻¹.

En el Cuadro 11, se muestra la matriz de coeficientes de correlación simple entre los metales pesados (cadmio y plomo) y los micronutrientes de la semilla de cinco clones de cacao. Allí, se pueden evidenciar correlaciones positivas y altamente significativas entre Cu/Zn ($r=0.869$), Mn/Fe ($r=0.755$), Fe/Zn ($r=0.655$) y Cu/Pb ($r=0.629$); mientras que correlaciones negativas altamente significativas para el Cd/Zn ($r=-0.666$) y Cd/Cu ($r=-0.531$).

Cuadro 11. Matriz de coeficientes de correlación simple de cadmio, plomo y micronutrientes de semillas de cinco clones de cacao.

METALES	Cd	Pb	Zn	Fe	Cu	Mn
Cd	1					
Pb	0.124	1				
Zn	-0.666**	0.18	1			
Fe	0.056	-0.005	0.655**	1		
Cu	-0.531**	0.629**	0.869**	0.439*	1	
Mn	0.365*	0.276	0.355	0.755**	0.303	1

Para $n=30$, se tiene $(n-2)$ gl = 28. Valores de $t_{\alpha} \leq 0.05=0.361$ y $t_{\alpha} \leq 0.01= 0.463$

Correlaciones positivas y significativas se obtuvieron para Cd/Mn ($r=0.365$) y Fe/Cu ($r=0.439$); mientras que correlaciones muy débiles se obtuvieron para Cd/Fe ($r=0.056$) y Pb/Fe ($r=-0.005$) muy cercanas a cero, lo cual se interpretaría como ausencia de una asociación lineal; sin embargo, podría existir una asociación no lineal muy fuerte entre ellas.

Se han reportado interacciones entre elementos traza que son coincidentes y/o controvertidas. En ciertos casos pueden ser antagonistas, aditivas o sinergistas, y las respuestas de las plantas a las proporciones binarias de los elementos parecen ser dependiente de la concentración (KABATA-PENDIAS, 2011). Los metales que pueden aumentar o disminuir la absorción de otros elementos, son fácilmente absorbidos y translocados a los retoños, siendo procesos competitivos, especialmente entre el Cd y Zn (MENGAL *et al.*, 2001)

En nuestro estudio, las interacciones Cd/Zn ($r = -0.666$) y Cd/Cu ($r = -0.531$) a nivel de semillas, fueron antagonistas, posiblemente por el efecto inhibitorio del Cu

y el Zn en la absorción del Cd, tal como lo reporta KABATA-PENDIAS (2011). Existiría pues una interacción competitiva no solo en los procesos de absorción radicular, sino también en la translocación a través de las proteínas transportadoras por causa de su similitud iónica (metales bivalentes). La interacción antagonista entre Cd/Zn ha sido corroborada por McKenna *et al.* (1993), citado por SARWAR *et al.* (2016); KABATA-PENDIAS (2011) y ALLOWAY (2013). Sin embargo, ARÉVALO *et al.* (2017), reportan que en almendras, la interacción entre Cd/Zn en hojas está correlacionada positivamente ($r = 0.21$), atribuyéndole una interacción sinergista en la planta y en el suelo, sugiriendo que el Zn tendría un efecto directo sobre la acumulación del cadmio en cacao.

En los cultivos anuales trigo, maíz y lenteja, se han reportado interacciones competitivas entre Cu/Zn (Imtiaz *et al.*, 2006; Narwal y Malik, 2011, citado por SHOLECHA, 2015). En cacao se ha reportado una interacción antagonista entre Cu/Zn, lo cual constituye el primer reporte para este cultivo. También se han encontrado efectos de interacción Cu/Zn en la absorción del Mg, Ca y Fe en el tejido vegetal del cacao (SHOLECHA, 2015).

Con respecto a la interacción Cu/Pb ($r=0.629$) en las semillas de cacao que fue altamente significativa, coincide con lo reportado por ARÉVALO *et al.* (2017) quienes indican que la concentración de Cu en las almendras estuvo principalmente correlacionada con las concentraciones de Pb y Mn en el suelo.

Estudios hidropónicos han reportado que los contenidos de Zn y Fe varían con el cultivar existiendo entre ellos una correlación directa. Además, se señala que el Cd afecta la absorción del Zn, Mn y Fe (CRYER y HADLEY, 2012). También, Dong y Zhang (2006), citado por NAZAR *et al.* (2012), reportan una correlación negativa significativa entre Cd y Mn en tomate, sugiriendo un efecto antagonista del Cd en la absorción y translocación del Mn. Nuestros resultados corroboran la correlación directa entre Zn/Fe por sus roles de activadores enzimáticos en el metabolismo celular y competir con el Cd^{+2} por los mismos transportadores de membranas. También, se corroboró el antagonismo entre Cd/Zn, pero no entre Cd/Fe, sin asociación lineal por el valor muy cercano a 0.

Los diferentes tipos de suelos, cultivares de cacao y edad; así como, las variables climáticas y manejo del cultivo, entre otros, que interactúan con los metales traza, devienen en procesos muy complejos y de difícil explicación. Las relaciones de competencia iónica en los sitios de adsorción, las propiedades de la superficie de la membrana celular y exudados de las raíces, y el involucramiento en el metabolismo de más de dos elementos, son algunos factores a tomarse en cuenta dada su naturaleza multivariada (KABATA-PENDIAS, 2011)

En la Figura 13, se muestra el diagrama biplot generado por el análisis de componentes principales basado en la matriz de covariancia que relaciona a los clones de cacao con el Cd, Pb y los micronutrientes esenciales en la semilla.

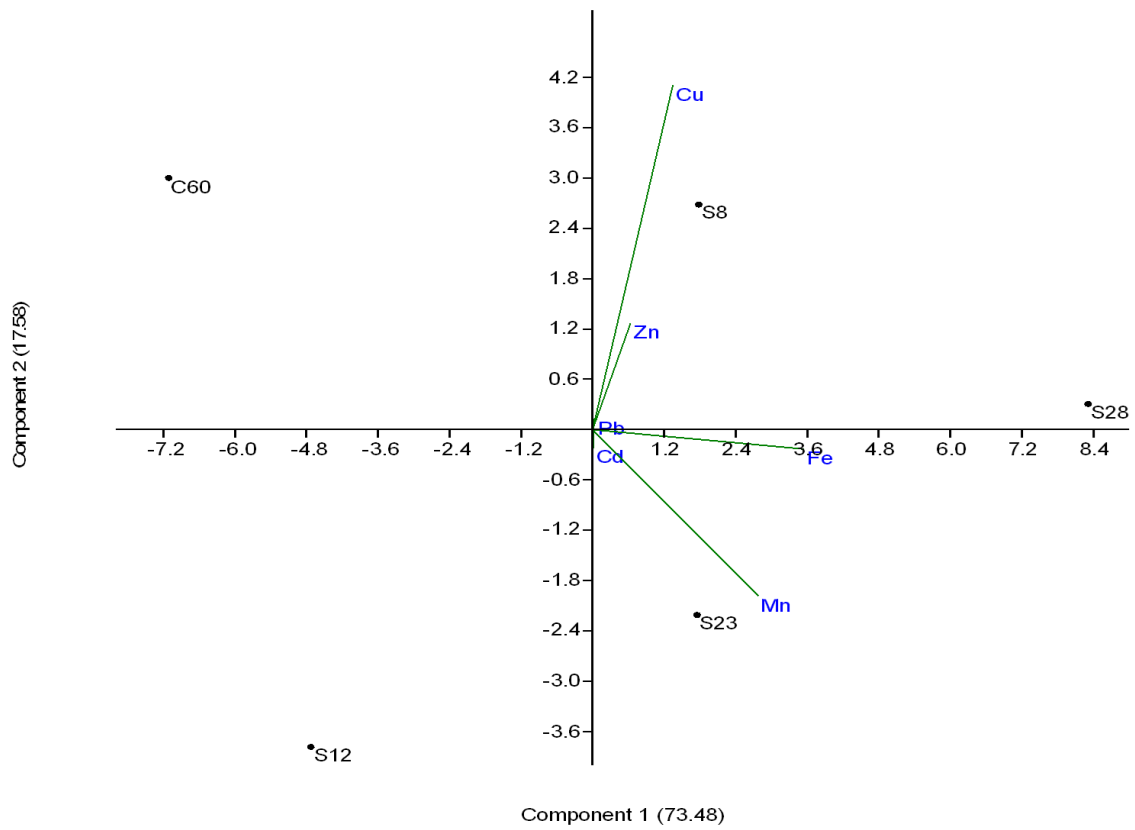


Figura 13. Diagrama biplot de clones de cacao, metales pesados (Cd, Pb) y micronutrientes (Zn, Fe, Cu y Mn), en las semillas.

El primer componente principal contribuye con el 73.5 % de la variancia total explicada, el segundo componente principal con el 17.6% y entre los dos con el 91.1% de la variancia total explicada. Los micronutrientes Cu y Zn, con valores positivos en el primer eje (CP1), están más cercanos al clon S-08, que con el clon S-28; mientras que el Mn y Cd, de valores negativos en el segundo eje (CP2), lo están con el clon S-23. También cabe destacar que el Zn y el Cd se encuentran alejados, el primero con valores positivos en el CP1 y el segundo con valores negativos en el CP2 y CP1, lo cual estaría demostrando una disimilitud entre ellos

por la existencia de una fuerza de asociación muy débil, tal como se ha evidenciado en la matriz de correlación del Cuadro 11.

Con relación al plomo (Pb) y cobre (Cu) ubicados en el CP1 y con valores positivos, se infiere que habría un parecido multivariado y un sinergismo que se corrobora con la correlación positiva y altamente significativa mostrada en la matriz de correlación del Cuadro 11. En cambio, se visualiza una débil fuerza de asociación entre el Pb con el Zn y el Fe.

4.4 Análisis químico inicial y final del suelo

En el Cuadro 12, se muestra los resultados del análisis químico (inicial y final) del suelo con los parámetros pH, M.O, CIC, macronutrientes (N, P y K), y metales pesados no esenciales (cadmio y plomo); así como, estadísticos descriptivos de tendencia central y dispersión.

Cuadro 12. Análisis químico del suelo (inicial y final) y estadísticos descriptivos de tendencia central y dispersión.

Suelo	pH	M.O	N	P	K	CIC	Cd	Pb
Suelo inicial	6.38	3.20	0.16	13.04	105.00	22.42	0.29	3.24
Suelo final	6.66	2.40	0.11	11.52	103.00	20.79	0.26	3.37
Promedio (x)	6.52	2.80	0.14	12.28	104.00	21.60	0.28	3.31
Desviación estándar(s)	0.20	0.57	0.04	1.07	1.41	1.13	0.02	0.09
C.V (%)	3.07	20.36	28.57	8.14	1.36	5.23	7.14	2.72

Según el Cuadro 12, durante los seis meses de monitoreo del suelo, la variación de los valores del pH fue inconspicua; mientras que para el contenido de M.O, las diferencias numéricas fueron conspicuas, posiblemente por el sitio de muestreo, nivel de profundidad, entre otros. El coeficiente de variación (C.V) igual a 20.36%, estaría reflejando una moderada variabilidad que sería natural e inherente a este parámetro.

Con relación al nitrógeno (N), si bien hubo una ligera variación del N al final del ensayo, ésta también fue intrascendente. El coeficiente de variación (C.V= 28.57%), ligeramente mayor al de la M.O, reflejaría también una variabilidad inherente de este parámetro. El nitrógeno es un macronutriente importante en muchos compuestos, con rol estructural, genético y metabólico en las plantas. Su esencialidad es clave para el crecimiento (mitosis celular), la biosíntesis y catabolismo de las proteínas, y la actividad enzimática, particularmente, de la nitrogenasa y la nitrato reductasa.

Se ha sugerido un posible mecanismo que desintoxica, reduce la translocación y minimiza la acumulación del Cd en cereales y leguminosas, cuando se mejora la nutrición nitrogenada. Pancovick *et al.* (2000), citado por SARWAR *et al.* (2016) en girasol, encontraron que a mayores dosis nitrogenada cuando el contenido de la proteína soluble y la Rubisco eran máximas, la inhibición de la actividad fotosintética por causa del Cd fue la más baja. En arroz, se reporta interacciones antagonistas entre fertilizantes amoniacales (NH_4^+), con el Cd, e

interacciones sinergistas entre fertilizantes nítricos (NO_3^-) con el Cd (Jalloh *et al.*, 2009, citado por SARWAR *et al.*, 2016)

Con respecto al fósforo (P), otro macronutriente esencial en el crecimiento y metabolismo vegetal; sin embargo, su exceso puede inducir deficiencias en los micronutrientes cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn), que son principalmente afectados por el fósforo (SHOLECHA, 2015). Así, una marcada reducción del Cu en el tejido foliar se obtuvo en respuesta a la absorción y translocación de P, desde las raíces. También la aplicación de altos niveles de fertilizante fosfatado redujo significativamente la concentración de Zn y del calcio (Ca) en plántulas de garbanzo (Srinivasarao *et al.* (2007), citado por SHOLECHA (2015). Los fertilizantes fosfatados pueden disminuir la movilidad del Cd en el suelo al cambiar las formas móviles-Cd a formas inmóviles de fosfato-Cd (Matusik *et al.*, 2008, citado por SARWAR *et al.*, 2016).

Se ha reportado que tanto el P como el azufre (S), están involucrados en la biosíntesis del glutatión (GSH), un precursor de las fitoquelatinas (PC) que inmovilizan (secuestran) el Cd en las vacuolas formando complejos Cd-PC (May *et al.*, 1998, citado por SARWAR *et al.*, 2016), y que están implicados en la tolerancia de las plantas al estrés por Cd.

Con relación al potasio (K), el contenido final de este macronutriente en el suelo no tuvo diferencia significativa con el contenido inicial de K. Si bien el contenido de K es bajo, este puede ser explicado por la extracción durante tres

años de cultivo con papayo (semillero), dos años con plátano cv. Bellaco (gran extractor de K del suelo) y la cantidad de K extraída por los frutos de cacao.

En cuanto al CIC, tampoco hubo diferencias conspicuas, interpretándose que es un suelo con buena capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se ha señalado que cuando existe una baja correlación entre el contenido de cadmio del suelo y la almendra, esta se puede atribuir a la fuerza con que el cadmio se retiene en el suelo. La CIC es determinada por los coloides del suelo que retienen los elementos con diferente fuerza, de allí que los cationes de mayor valencia o que presentan menor grado de hidratación, son retenidos con mayor fuerza y por tanto, reducen su posibilidad de extracción por parte de la planta (HUAMANI y HUAUYA, 2011).

Con relación al calcio (Ca), un oligonutriente esencial que no fue considerado en el análisis de la semilla seca, algunos reportes muestran que el ion Ca^{+2} ayuda a aliviar la toxicidad del ion Cd^{+2} , pues tanto el Ca^{+2} como el Cd^{+2} compiten por los mismos transportadores de membranas dada su afinidad y similitud catiónica bivalente. Los cationes Ca^{+2} alivian la inhibición del crecimiento radicular disminuyendo la muerte celular (apoptosis).

Aunque la fijación del cadmio Cd^{+2} es evidente, su movilidad está correlacionada significativamente con el pH del suelo (Basta *et al.*, 2001, citado por KABATA-PENDIAS, 2001). Se ha reportado a nivel mundial que el contenido promedio de concentración del cadmio en suelos es de 0.41 mg/kg^{-1} (KABATA-PENDIAS (2001). Los niveles de cadmio en el suelo de 0.29 y 0.26 ppm, al inicio y

final respectivamente, al cabo de seis meses de monitoreo, no reflejaron una variación numérica relevante.

La absorción de cadmio en las raíces depende tanto de su biodisponibilidad como de su concentración en el suelo, la presencia de materia orgánica, el pH, el potencial redox, la temperatura, la concentración de otros elementos (SANITA DI TOPPI y GABRIELLI, 1999); la salinidad, intensidad de la luz y el nivel de O₂ (PRASAD y STRZALKA, 1999)

V. CONCLUSIONES

1. La cinética de acumulación de cadmio y plomo en órganos aéreos del cacao mostró un paralelismo reduccional entre junio a septiembre (menores precipitaciones) e incrementacional entre octubre y noviembre (mayores precipitaciones), acumulándose el Cd en orden decreciente: hojas (1.288 ppm) > semillas (0.894 ppm) > epicarpio del fruto (0.710 ppm), y Pb: hojas (5.649 ppm) > epicarpio del fruto (4.336 ppm) > semillas (3.476 ppm)
2. Se encontraron respuestas diferenciales entre clones de cacao a la acumulación de cadmio y plomo, teniendo los clones: S-08 y C-60 las menores acumulaciones de Cd (0.650 ppm y 0.815 ppm), respectivamente, y de Pb (3.319 ppm y 3.658 ppm), respectivamente a nivel de semillas, por debajo de los límites máximos permisibles.
3. Interacciones sinérgicas se encontraron entre Cu/Zn ($r=0.869^{**}$), Mn/Fe ($r=0.755^{**}$), Fe/Zn ($r=0.655^{**}$) y Cu/Pb ($r=0.629^{**}$), e interacciones antagonistas entre Cd/Zn ($r=-0.666^{**}$) y Cd/Cu ($r=-0.531^{**}$), en las semillas.
4. Los valores del pH, M.O, CIC, contenido de macronutrientes (N, P y K) y metales pesados (Cd y Pb) en los análisis físico-químico (inicial y final) del suelo, no mostraron diferencias numéricas conspicuas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Mientras no se conozca o disponga de otros clones promisorios hipoacumuladores de Cd y/o Pb en cacao, se sugiere propagar y usar la semilla vegetativa de los clones S-08 y C-60.
2. Continuar con los estudios eco-fisio-genéticos de acumulación de Cd, Pb y otros metales pesados (As, Cr, Hg, etc.), incluyendo otros clones de cacao para seleccionar genotipos con baja acumulación de metales pesados a nivel de semillas, por debajo de los límites máximos permisibles.
3. Los estudios eco-fisio-genéticos deberían involucrar otros micronutrientes esenciales como el boro (B), silicio (Si) y molibdeno (Mo), para comprender mejor el grado de interacción entre éstos y los metales pesados.
4. A nivel nacional se debería diseñar e implementar un Plan nacional de investigación estratégica, al corto (3 años), mediano (6 años) y largo plazo (10 años), en diferentes agroecosistemas (ambientes), con el fin de mapear y monitorear el comportamiento del trinomio suelo-planta-clima, implementando acciones de mitigación y manejo (v.g. fitorremediación) de suelos contaminados con metales pesados.

VII. RESUMEN

Con el objetivo de estudiar la cinética de acumulación de los metales pesados cadmio (Cd) y plomo (Pb) en clones de cacao para identificar aquellos de reducida acumulación, tanto en órganos vegetativos como reproductivos, este estudio se realizó de junio a noviembre, 2017 en la Estación Tulumayo. Como material genético se utilizó cinco clones de cacao: S-08, S-12, S-23, S-28 y C-60 seleccionados por sus buenas características agronómicas y de calidad. Los análisis físico-químicos del suelo (inicio y final) se hicieron con métodos estandarizados y en la determinación de metales pesados (Cd y Pb) en hojas, endocarpio del fruto y semillas del cacao, se usó el espectrofotómetro de absorción atómica. Para el análisis de datos se utilizaron estadísticos univariado (tendencia central y dispersión), bivariado (correlación de Pearson) y multivariado (componentes principales) basado en la matriz de covariancia. Los resultados de la cinética de acumulación del Cd y Pb en los órganos aéreos muestran un paralelismo reduccional de Junio a Septiembre (menores precipitaciones) e incrementacional en Octubre y Noviembre (mayores precipitaciones), acumulándose el Cd en orden decreciente: hojas (1.288 ppm) > semillas (0.894 ppm) > epicarpio del fruto (0.710 ppm) y el Pb: hojas (5.649 ppm) > epicarpio del fruto (4.336 ppm) > semillas (3.476 ppm); con diferencias entre clones, teniendo los clones S-08 y C-60 las menores acumulaciones de Cd con 0.650 ppm y 0.815 ppm, respectivamente y de Pb con 3.319 ppm y 3.658 ppm, respectivamente en las semillas por debajo de los límites máximos permisibles. Además, se encontraron interacciones sinérgicas relevantes entre Cu/Zn, Mn/Fe, Fe/Zn y Cu/Pb, e

interacciones antagonistas entre Cd/Zn y Cd/Cu. Los valores de pH, M.O, CIC, contenido de macronutrientes (N, P y K) y metales pesados (Cd y Pb) del análisis físico-químico (inicial y final) del suelo, no mostraron diferencias numéricas conspicuas. Futuros estudios de cinética de acumulación de Cd, Pb y otros metales pesados en semillas de cacao deben ser realizados todo el año y por cada fase fenológica, incluyendo otros clones de cacao de diferente origen genético y potencial hipoacumulador.

ABSTRACT

With the purpose of studying the kinetics of the accumulation of the heavy metals, cadmium (Cd) and lead (Pb) in five cacao clones, identifying those with reduced accumulation in vegetative and reproductive organs, this study was done from June to November, 2017, in the Tulumayo station. As the genetic material, the S-08, S-12, S-23, S-28 and C-60 cacao clones were used, selected for their good agronomic characteristics and quality. The physical-chemical analysis of the soil (start and finish) was done with standardized methods and for the determination of the heavy metals (Cd and Pb) in the cacao leaves, fruit endocarp and seeds, the atomic absorption spectrophotometer was used. For the data analysis, univariate statistics (central and dispersion tendency) were used; bivariate (Pearson's correlation) and multivariate (principal components) based on the covariance matrix. The results showed a reductional parallelism in the kinetics of the accumulation of Cd and Pb in the aerial organs, which were less between June and September (lower precipitation) with a tendency to increase between October and November (greater precipitation), accumulating in a descending order for Cd: leaves (1.288 ppm) > seeds (0.894 ppm) > fruit endocarp (0.710 ppm), and for Pb: leaves (5.649 ppm) > fruit epicarp (4.336 ppm) > seeds (3.476 ppm); with differences between clones, exhibiting the clones S-08 and C-60 the least accumulation of Cd (0.650 ppm and 0.815 ppm), respectively, and Pb (3.319 ppm and 3.658 ppm), respectively, in the seeds under the maximum limit allowed. Moreover, relevant synergistic interactions were found between Cu/Zn, Mn/Fe, Fe/Zn and Cu/Pb, and antagonistic interactions between Cd/Zn and Cd/Cu. The pH, O.M and C.E.C values,

macronutrients content (N, P and K) and heavy metals (Cd and Pb) resulting from the physical-chemical analysis (start and finish) of the soil, showed no conspicuous numerical differences. Future study of the kinetics of the accumulation of Cd, Pb and other heavy metals in cacao seeds should be done throughout an entire year, monitoring each phenological phase and including other cacao clones of different genetic origin and hypo accumulating potential.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACOSTA, A. 2013. Efecto del sulfato de cadmio en la germinación y el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L). Investigación y Amazonía, 3 (1): 20-29.
2. AIKPOKPODION, P. 2010. Nutrients dynamics in cocoa soils, leaf and beans in Onto state, Nigeria. J. Agri. Sci. 1(1):1-9.
3. ALLOWAY, B.J. 2013. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3 ed. Environmental Pollution, vol. 22. Springer, USA. 614p.
4. ARAUJO, Q.R., FERNANDES, C.A.F., RIBEIRO, D.O., EFRAIM, P., STEINMACHER, D., LIEBEREI, R., BASTIDE, P. y ARAUJO, T.G. 2014. Cocoa quality index - a proposal. Food Control 46, 49-54.
5. AREVALO, E., AREVALO, C., BALIGAR, V. y HE, Z. 2017. Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Thebroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Perú. Science of the Total Environment, 605-606:792-800[Enlínea]:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>. (Documento revisado el 20 de agosto del 2018).

6. BALIGAR V.C., FAGERIA N.K. y HE, Z.L. 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7): 921-950.
7. BAZAN, R. 1996. Manual para análisis químicos de suelos, plantas y agua. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. 96 p.
8. BENAVIDES, M.P., GALLEGGO, S.M. y TOMARO, M.L. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17 (1):21–34. [En línea]: <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>. (Documento revisado el 17 de julio del 2018).
9. BENZING, A. 2001. Agricultura orgánica: Fundamentos para la región Andina. Neckar-Verlag, Pastfach., Germany. 682 p.
10. BERTOLDI, D., BARBERO, A., CAMIN, F., CALIGIANI, A. y LARCHER, R. 2016. Multielemental fingerprinting and geographic traceability of *Theobroma cacao* L. beans and cocoa products. *Foods Control*, 65: 46-53.
11. BUSINELLI, D., MASSACCESI, L., SAID-PULLICINO, D. y GIGLIOTTI, G. 2009. Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. *Sci. Total Environ.* 407: 1426-1435.

12. CÁRDENAS, A. 2012. Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo, Tingo María, Perú. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Huánuco. Perú. 96 p.
13. CHAN, D.Y. y HALE, B.A. 2004. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*, 55: 2571-2579.
14. CHARLEY, W., JEROME, O. y JUPDEED, K. 2005. Lead contamination in cocoa and cocoa products: isotopic evidence of global contamination. *Environ. Health Perspect.* 1344-1348.
15. CIKILI, Y., SAMET, H. y DURSUN, S. 2016. Cadmium toxicity and its effects on growth and metal nutrient ion accumulation in *Solanaceae* plants. *Journal of Agricultural Sciences*, 22: 576-587.
16. CLEMENS, S., PALGREN, M.G. y KRAMER, U. 2002. Alone way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 7: 309-315.
17. COMISION EUROPEA (CE). 2014. Reglamento (UE) No 488/2014 de la Comisión del 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) No

1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Bruselas.

18. CRYER, N. y HADLEY, P. 2012. Cadmium uptake and partitioning within the cocoa plant. International Workshop on Cadmium on Cocoa and Chocolates Products. London, 3-4 May 2012.
19. DE GEUS, J.G. 1973. Fertilizer guide for tropical and subtropical farming. Centre d'Etude de l'Azote. Second edition. Zurich. 774 p.
20. DOUCHICHE O., DRIOUICH A. y MORVAN C. 2010. Spatial regulation of cell-wall structure in response to heavy metal stress: cadmium-induced alteration of the methyl-esterification pattern of homogalacturonans. *Ann. Bot.*, 105:481-491.
21. EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. 2012. Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal* 2012, 10(1): 2551.
22. FAHMY, F.N. 1977. Cocoa. Department of Primary Industry. Papua New Guinea. International Soil Conference, Kuala Lumpur, Malaysia. s/p.
23. FONTES M.P.F., DE MATOS A.T., DA COSTA, L.M y NEVES J.C.L. 2000. Competitive absorption of zinc, cadmium, copper and lead in three highly-weathered Brazilian soils. *Commun Soil Sci, Plant Anal.*, 31: 2939-2958.

24. GARCIA, L.F. 2012. Catálogo de cultivares de cacao del Perú. 2 ed. Ministerio de Agricultura- DGCA. Lima, Perú. 112 p.
25. GARCIA, I. y DORRONSORO, C. 2005. Contaminación por metales pesados. En: Tecnología de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química agrícola. 267p. [En línea]: <http://edafología.ugr.es> (Revisado el 8 de marzo del 2018)
26. GUERINOT, M.L. 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1465:190-198.
27. HOODA, P. 2010. Trace elements in soils. John Willey and Sons Ltd. Cambridge University. United Kingdom, 618 p.
28. HUAMANÍ, H., HUAUYA, M., MANSILLA, L., FLORIDA N. y NEIRA, G. 2012. Presencia de metales pesados en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61 (4): 339-344.
29. HUAMANÍ, H. y HUAUYA, M. 2011. Contenido de cadmio y plomo en la producción de cacao en San Martín. Informe de Consultoría. CAI-Naranjillo. 30 de Diciembre, 2011.
30. IZQUIERDO, A. 1988. Determinación de contaminación con cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y su posible origen en la región de

Barlovento, Estado Miranda. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

31. JIMÉNEZ, C.S. 2015. Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Thebroma cacao* L.): fantasía o realidad. Producción + Limpia, Enero-Junio, 2015. vol. 10, n° 1: 89-104.
32. JIN C. W., ZHENG S.J., HE Y.F. *et al.* 2005. Lead contamination in the garden soils and factors affecting its bioavailability. Chemosphere 59:1151-1159.
33. JONES, J. Jr. 2001. Laboratory guide for conducting soils tests and plant analysis. CRC Press. Boca Ratón. Florida. 382p.
34. JONES, C. y OLSON-RUTZ, K. 2016. Plant nutrition and soil fertility. Nutrient management, N° 2, Montana State University. Extension Bulletin, 12 p.
35. KABATA-PENDIAS, S. 2011. Trace elements in soils and plants. Third edition. CRS Press. Boca Raton. USA. 413 p.
36. LI, X., ZHOU, Y., YANG, Y., YANG, S., SUN, X. y YANG, Y. 2015. Physiological and proteomics analyses reveal the mechanism of *Eichhornia crassipes* tolerance to high-concentration cadmium stress compared with *Pistia stratiotes*. PLoS One, 2015, Apr. 17, 10(4).

37. MALAVOLTA, E., VITTI, G.C. y OLIVEIRA, S.A. 1997. Avaliacao do estado nutricional das plantas: principios e aplicacoes. 2 ed. Associacao Brasileira para Pesquisa de Potassa e do Fosfato. Piracicaba. 319 p.
38. MARTÍNEZ, K., SOUZA, V., BUCIO, L., GÓMEZ, L. y GUTIÉRREZ, M. 2012. Cadmium: effects on health. Cellular and molecular response. (Abstract).
39. MENGAL, K., KIRKBY, E.A., ROSEGARTEN, H. y APPEL, T. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers Dordrecht. The Netherlands. Springer. 849 p.
40. MORADI, A., ABBASPOUR, K.C. y AFYUNI, M. 2005. Modelling field-scale cadmium transport below the root zone of sewage sludge amended soil in an arid region in Central Iran. Journal of Contaminant Hydrology, 79: 187-206.
41. MORTVEDT J., GIORDANO, P. y LINDSAY, W. 1993. Micronutrientes en Agricultura. AGT editor. México.
42. NAZAR, R., IQAL, N., MASOOD, A., IQAL, M., KHAN, R., SYUEED, S. y KHAN, N.A. 2012. Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation. American Journal of Plant Sciences, 2012, 3: 1476-1489.

43. OLAYINKA, N., NENNAYA, N. y CHUKWUEMEKA, A. 2011. Characterization and evaluation of selected Nigerian agricultural by products for copper and zinc sorption. *Journal of Environmental Sciences and Resource Management*. Volume 3, March, 2011.
44. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). 1992. Evaluación de diversos aditivos alimentarios y los contaminantes: mercurio, plomo y cadmio. *Información Técnica n° 50*. FAO, Roma.
45. PINTO, A.P., MOTA, A.M., DE VARENNES, A. y PINTO, F.C. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Science of the Total Environment*, 326: 239-274.
46. PIETRINI F., IORI V., BIANCONI, D., MUGHINI, G., MASSACCI, A. y ZACCHINI, M. 2015. Assessment of physiological and biochemical responses, metal tolerance and accumulation in two eucalypt hybrid clones for phytoremediation of cadmium-contaminated waters. *Environ Manage*. October 1, 162:221-231.
47. PRASAD, M.N.V y STRZALKA, K. 1999. Impact of heavy metals on photosynthesis. In: *Heavy Metal Stress in Plants*, Prasad, M.N.V. and Hagemeyer, J. (eds.). Springer, Heidelberg, 117.

48. PRIETO, J., GONZÁLEZ, C., ROMÁN, A. y PRIETO, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 10, n°1, p. 29-44. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
49. RAHIMZADEH, M., RAHIMZADEH, M.R., KAZEMI, S. y PHARM, A.M. 2017. Cadmium toxicity and treatment: an update. *Caspian J. Intern. Med.* 2017, 8(3): 135-145.
50. RAMTAHAL, G., YEN, I.C., BEKELE, I., BEKELE, F., WILSON, L., MAHARAJ K. y HARRYNANAN, L. 2016. Relationships between cadmium in tissues of cacao trees and soils in plantations of Trinidad and Tobago. *Food Nutr. Sci.* 7:37- 43. [En línea]: <http://dx.doig.org/10.4236/fns.2016>. (Revisado el 26 de junio del 2018)
51. REIS, G.S.M., ALMEIDA, A.A.F., ALMEIDA, N.M., CASTRO, A.V., MANGABEIRA, P.A.O. y PIROVANI, C.P. 2015. Molecular, biochemical and ultrastructural changes induced by Pb toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *PLoS One*, 10(7). e0129696. [En línea]: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0129696>. (Revisado el 6 de noviembre del 2018)
52. REYES, Y.C., VERGARA, I., TORRES, O.E., DÍAZ-LAGOS, M., y GONZÁLEZ, E.E. 2016. Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud,

ambiente y seguridad alimentaria. Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16 (2): 66-77.

53. REYES, E. y MARÍA, A. 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, p. 62 - 73.
54. RODRIGUEZ-SERRANO, M., MARTINEZ DE LA CASA, N., ROMERO-PUERTAS, M.C., DEL RIO, L.A. y SANDALIO, L.M. 2008. Toxicidad del cadmio en plantas. Ecosistemas, 17 (3): 139-146. Asociación Española de Ecología Terrestre. Granada.
55. SANITA DI TOPPI, L, y GABBRIELLI, R. 1996. Response to cadmium in higher plants. Environ. Exp. Bot., 41: 105-130.
56. SARWAR, N., SAIFULLAH, B., MALHI, S., ZIA, M.H., NAEEN, A, BIBI, S. y FARID, G. 2010. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. J. Sci. Food Agric., 90: 925-937.
57. SHAH, K. y NONGKYNRIH, J.M. 2007. Metal hyperaccumulator and bioremediation. Biologia Plantarum, 51: 618-634.

58. SHARMA, A y SACHDEVA, S. 2015. Cadmium toxicity and its phytoremediation: a review. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 9, September, 2015.
59. SHOLECHA, N. 2015. Interaction of vascular streak dieback disease of cocoa with soil nutrient status in Indonesia. Thesis Master of Philosophy at the University of Queensland. Australia. 137p.
60. STEEL, R., y TORRIE, J. 1980. Bioestadística: principios y procedimientos. R. Martínez (trad). 2 ed. Mc Graw-Hill. Colombia. 622 p.
61. THOMINE, S., WANG, R., WARD, J., CRAWFORD, N. y 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.
62. VACULÍK, M., KONLECHNER, C., LANGER, I., ADLASSNIG, W., PUSCHENREITER, M., LUX, A. y HAUSER, M.T. 2012. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities. Environmental, Pollution, 163 (1):117-126.

63. VERBRUGGEN, N., HERMANS, C. y SCHAT, H. 2009. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. *A Current Opinion in Plant Biology*, 12: 364-372.
64. VOOS, M. 1998. Micronutrients. The Netherlands. Wageningen. 69 p.
65. WAGNER, G.J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.*, 51: 173-212.
66. ZHI, WU., SHENG, LI., YU, FEN., ZI, SHENG., WU, XUE y XUE, BAO. 2006. Mechanisms of heavy metal cadmium tolerance in plants (Abstract).
67. ZITKA, O., KRYSTOFOVA, O., HYNEK, D., SOBROVA, P., KAISER, J., SOCHOR, J., ZEHNALÉK, J., BABULA, P., FERROL, N., KIZEK, R. y ADAM, V. 2013. Metal transporters in plants. In: D. K. Gupta *et al.* (eds.), *Heavy Metal Stress in Plants*. 242 p.

IX. ANEXO

Cuadro 13. Plan de abonamiento del campo experimental (ex semillero de papayo)

Producto	Cantidad elemento	Ley	kg/ha	N° plantas	kg/pl/año	g/pl/año	Fertiliz. 1 (g/planta)	Fertiliz. 2 (g/planta)	Fertiliz. 3 (g/ planta)
Úrea	120	46	260,87	1666	0,16	156,58	31, 32	62,63	62,63
Superfosfato triple.	120	46	260,87	1666	0,16	156,58	31, 32	62,63	62,63
Cloruro de potasio	100	60	166,67	1666	0,10	100,04	20,01	40,02	40,02
Bórax				1666	0,01	10,00	0,00	5,00	5,00

Características

Formulación : 120 - 120 - 100

Distanciamiento : 3x 2 m.

N° plantas/ Ha : 1666

Fertilización 1° : 20 % de la formula general

Fertilización 2° : 40 % de la formula general

Fertilización 3° : 40 % de la formula general

Mezcla de productos

Producto	Fertilización		
	1	2	3
Úrea	52.17	104.35	104.35
Super triple	52. 17	104.35	104.35
Cloruro potasio	33.33	66.67	66.67
Bórax	0.00	8.33	8.33

Cuadro 14. Contenido de Cd, Pb y micronutrientes (ppm) en hojas de cinco clones de cacao de diferente origen genético.

Evaluación	Clon	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
1°	S12	36.09	143.50	43.25	6.03	2.688	15.588
	S23	32.89	239.63	40.63	5.06	3.938	13.263
	C60	33.84	83.38	58.63	5.41	2.813	13.013
	S08	33.45	12.09	47.88	5.40	3.438	14.338
	S28	32.81	100.50	56.25	4.90	3.100	15.075
2°	S12	505.00	188.75	70.00	2.21	0.738	5.700
	S23	513.75	201.25	36.25	3.09	0.875	4.813
	C60	486.25	163.75	55.00	3.21	0.450	4.725
	S08	510.00	148.75	60.00	3.38	0.750	2.713
	S28	513.75	183.75	62.50	4.31	1.563	6.388
3°	S12	502.50	177.50	55.00	2.65	0.813	2.975
	S23	475.00	190.00	30.00	5.09	0.800	2.563
	C60	473.75	150.00	92.50	3.84	0.413	1.913
	S08	535.00	157.50	95.00	4.76	0.725	3.038
	S28	491.25	202.50	75.00	4.56	1.625	6.113
4°	S12	472.50	216.25	30.00	2.33	0.763	2.875
	S23	493.75	171.25	23.75	4.83	1.450	2.575
	C60	477.50	93.75	26.25	4.30	0.625	3.088
	S08	457.50	66.25	27.50	3.09	0.850	3.238
	S28	472.50	370.00	41.25	2.24	1.325	3.663
5°	S12	465.00	73.75	12.50	4.74	0.838	2.838
	S23	533.75	225.00	56.50	4.10	0.800	2.088
	C60	487.50	202.50	40.00	1.73	0.813	3.275
	S08	482.50	145.00	93.75	5.95	0.550	2.925
	S28	528.75	445.00	48.75	3.30	0.563	3.088
6°	S12	487.50	142.50	27.50	1.21	0.988	8.763
	S23	570.00	272.50	54.00	0.51	0.688	5.188
	C60	573.75	176.25	83.75	0.61	0.763	4.725
	S08	517.50	148.75	65.00	36.25	0.863	3.213
	S28	518.75	500.00	92.50	43.75	2.038	5.713

Cuadro 15. Contenido de Cd, Pb y micronutrientes (ppm) en el endocarpio de cinco clones de cacao de diferente origen genético.

Evaluación	Clon	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
1°	S12	45.40	6.74	18.38	8.23	0.750	9.100
	S23	43.16	5.14	22.50	10.89	0.950	9.350
	C60	62.73	10.63	21.50	9.40	1.175	10.763
	S08	32.74	8.00	41.50	10.98	1.613	11.225
	S28	48.79	16.15	19.88	9.94	1.463	9.038
2°	S12	471.25	30.00	46.25	6.98	0.300	1.875
	S23	518.75	63.75	82.50	53.75	1.063	3.663
	C60	496.25	37.50	81.25	12.33	0.875	2.725
	S08	536.25	28.75	57.50	2.85	0.163	2.350
	S28	541.25	52.50	88.75	10.38	0.825	2.963
3°	S12	528.75	25.00	82.50	7.40	0.300	1.975
	S23	477.50	25.00	96.25	14.00	0.563	2.813
	C60	467.50	23.75	78.75	5.18	0.238	1.888
	S08	468.75	40.00	98.75	17.61	0.750	2.075
	S28	486.25	52.50	98.75	10.06	0.538	2.288
4°	S12	481.25	48.75	26.25	11.89	0.925	4.550
	S23	501.25	32.50	16.25	1.95	0.625	4.150
	C60	503.75	26.25	21.25	6.91	0.613	3.700
	S08	473.75	23.75	6.25	1.18	0.275	2.538
	S28	488.75	27.50	15.88	12.85	0.350	3.038
5°	S12	490.00	18.75	2.25	11.86	0.325	3.388
	S23	488.75	23.75	2.30	53.75	0.500	3.613
	C60	478.75	23.75	4.96	17.81	0.500	3.538
	S08	477.50	28.75	3.05	14.98	0.363	3.288
	S28	481.25	20.00	1.99	12.74	0.600	3.563
6°	S12	495.00	31.25	54.38	16.83	1.025	4.475
	S23	508.75	37.50	42.00	15.83	0.988	3.988
	C60	510.00	27.50	28.38	7.70	0.925	4.538
	S08	485.00	30.00	60.38	7.10	1.325	4.038
	S28	490.00	28.75	16.13	10.38	0.400	3.525

Cuadro 16. Contenidos de Cd, Pb y micronutrientes (ppm) en semillas de cinco clones de cacao de diferente origen genético.

Evaluación	Clon	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
1°	S12	31.71	7.34	35.13	12.16	1.875	5.950
	S23	35.16	8.66	43.13	11.23	2.538	7.188
	C60	37.28	7.98	36.13	15.59	1.400	6.313
	S08	34.54	12.78	36.63	16.38	1.213	6.088
	S28	35.00	11.23	36.26	13.95	1.573	5.675
2°	S12	491.25	36.25	46.25	13.54	0.450	2.125
	S23	485.00	32.50	68.75	35.00	0.488	2.000
	C60	483.75	35.00	58.75	50.00	0.738	2.713
	S08	498.75	33.75	62.50	51.25	0.700	2.363
	S28	488.75	36.25	75.00	52.50	0.713	2.763
3°	S12	478.75	33.75	121.25	11.45	0.775	2.650
	S23	480.00	33.75	117.50	31.25	0.788	2.325
	C60	480.00	31.25	111.25	8.15	0.575	2.413
	S08	482.50	30.00	107.50	16.19	0.400	1.550
	S28	495.00	52.50	117.50	7.33	0.450	2.825
4°	S12	521.25	41.25	37.50	0.21	0.713	2.600
	S23	526.25	42.50	38.75	1.16	0.913	2.875
	C60	506.25	30.00	36.25	0.56	0.738	3.775
	S08	482.50	32.50	27.50	12.60	0.563	3.038
	S28	542.50	47.50	30.00	12.60	0.863	2.850
5°	S12	475.00	23.75	10.00	53.75	0.875	3.313
	S23	495.00	35.00	18.75	45.00	0.713	3.063
	C60	473.75	28.75	23.75	71.25	0.725	3.763
	S08	518.75	30.00	36.25	56.25	0.513	3.163
	S28	485.00	35.00	17.50	57.50	0.938	3.750
6°	S12	492.50	37.50	57.63	66.25	1.050	2.900
	S23	505.00	38.75	23.75	51.25	1.413	3.488
	C60	492.50	26.25	46.63	46.25	0.713	2.975
	S08	512.50	35.00	53.63	43.75	0.513	3.713
	S28	493.75	41.25	46.00	61.25	0.900	4.038

Cuadro 17. Contenido de macronutrientes (%) en hojas de cinco clones de cacao de diferente origen genético.

Evaluación	Clon	K	Na	Ca	Mg
1°	S12	1.058	0.158	1.771	1.300
	S23	0.985	0.258	1.644	4.400
	C60	1.351	0.234	1.945	1.175
	S08	0.913	0.116	2.249	1.238
	S28	0.694	0.168	3.013	1.025
2°	S12	0.876	0.154	1.095	1.175
	S23	0.957	0.220	1.031	1.888
	C60	0.416	0.213	0.984	1.275
	S08	0.519	0.113	0.945	1.138
	S28	0.323	0.139	0.960	1.125
3°	S12	0.779	0.049	0.511	1.188
	S23	0.921	0.049	0.504	1.125
	C60	0.066	0.029	0.463	1.050
	S08	0.215	0.024	0.516	1.113
	S28	0.199	0.020	1.070	1.163
4°	S12	0.451	0.438	0.578	1.025
	S23	0.444	0.359	0.533	1.025
	C60	0.729	0.435	0.566	1.088
	S08	0.199	0.486	0.546	1.038
	S28	0.548	0.440	0.553	1.075
5°	S12	0.769	0.423	0.491	1.150
	S23	0.989	0.563	0.556	1.175
	C60	0.850	0.511	0.508	1.088
	S08	0.563	0.691	0.584	1.175
	S28	0.643	0.546	0.555	1.188
6°	S12	0.734	0.310	0.788	0.334
	S23	1.319	0.684	1.069	1.175
	C60	0.954	0.344	0.695	1.063
	S08	0.629	0.535	0.528	1.100
	S28	0.574	0.491	0.871	1.138

Cuadro 18. Contenido de macronutrientes (%) en el endocarpio del fruto de cinco clones de cacao de diferente origen genético.

Evaluación	Clon	K	Na	Ca	Mg
1°	S12	0.268	0.286	0.134	0.131
	S23	1.748	0.231	0.173	0.181
	C60	2.514	0.201	0.184	0.191
	S08	2.240	0.208	0.275	0.188
	S28	1.556	0.234	0.204	0.173
2°	S12	0.315	0.205	0.416	0.134
	S23	0.979	0.193	0.474	0.305
	C60	0.818	0.171	0.430	0.159
	S08	0.663	0.144	0.401	0.126
	S28	1.190	0.246	0.456	0.193
3°	S12	0.113	0.077	0.088	0.129
	S23	0.914	0.078	0.299	0.176
	C60	0.874	0.046	0.079	0.140
	S08	0.170	0.042	0.521	0.255
	S28	0.405	0.066	1.833	0.209
4°	S12	0.713	0.600	0.283	0.179
	S23	2.375	0.704	0.286	0.149
	C60	1.085	0.175	0.132	0.163
	S08	0.605	0.458	0.064	0.138
	S28	0.704	0.523	0.089	0.130
5°	S12	0.836	0.439	0.124	0.169
	S23	0.889	0.256	0.079	0.134
	C60	0.775	0.470	0.083	0.143
	S08	0.410	0.549	0.107	0.180
	S28	0.841	0.601	0.115	0.225
6°	S12	1.909	0.476	0.137	0.148
	S23	0.880	0.570	0.127	0.165
	C60	1.568	0.558	0.461	0.173
	S08	1.220	0.336	0.453	0.228
	S28	0.233	0.436	0.433	0.171

Cuadro 19. Contenido de macronutrientes (%) en semillas de cinco clones de cacao de diferente origen genético.

Evaluación	Clon	K	Na	Ca	Mg
1°	S12	0.680	0.094	0.097	0.316
	S23	0.958	0.119	0.098	0.245
	C60	1.015	0.071	0.089	0.334
	S08	1.455	0.121	0.109	0.299
	S28	0.875	0.121	0.099	0.223
2°	S12	0.149	0.204	0.051	0.213
	S23	0.448	0.565	0.054	0.254
	C60	1.248	0.448	0.054	0.310
	S08	0.476	0.431	0.053	0.226
	S28	0.251	0.196	0.057	0.249
3°	S12	0.723	0.045	0.060	0.225
	S23	0.310	0.092	0.060	0.233
	C60	0.674	0.069	0.057	0.226
	S08	1.688	0.031	0.058	0.204
	S28	0.648	0.046	0.060	0.259
4°	S12	1.153	0.623	0.054	0.339
	S23	1.016	0.464	0.055	0.291
	C60	0.914	0.425	0.051	0.344
	S08	1.194	0.439	0.053	0.253
	S28	1.069	0.428	0.060	0.296
5°	S12	0.698	0.471	0.409	1.013
	S23	1.189	0.526	0.416	1.025
	C60	0.855	0.600	0.398	0.938
	S08	1.385	0.626	0.405	0.988
	S28	0.616	0.404	0.391	0.988
6°	S12	1.255	0.524	0.058	0.383
	S23	1.636	0.518	0.066	0.373
	C60	0.210	0.583	0.053	0.263
	S08	0.285	0.524	0.055	0.278
	S28	0.895	0.450	0.059	0.339

Cuadro 20. Resultados del análisis físico-químico, inicial y final del suelo.



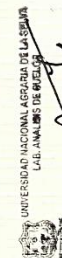
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
AV. UNIVERSITARIA S/N - TINGO MARIA • CELULAR 941531359
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos
analisisdesuelos@unase.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE				JENNIFER GARCIA RODRIGUEZ							PROCEDENCIA					JOSE CRESPO Y CASTILLO												
N°	COD. LAB.	DATOS		ANALISIS MECANICO			pH	M.O.	N	P	K	Cd	Pb	C/C	CAMBIABLES						C/Ce	%	Ac. Camb.	%				
		SECTOR	Arena	Arcilla	Limo	%									%	%	%	%	%	%					%	%	%	%
				%	%	%	1:1	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		Ca	Mg	K	Na	Al	H								
1	S2323	TULUMAYO	19.25	38.4	42.36	Frango Arcillo Limoso	6.45	2.05	0.09	9.61	37.48	0.27	3.54	20.22	13.82	1.48	3.41	1.50	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
2	S2324	TULUMAYO	19.25	30.4	50.36	Frango Arcillo Limoso	6.60	3.71	0.17	8.37	68.97	0.22	2.68	28.82	22.40	2.67	2.63	1.13	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
3	S2325	TULUMAYO	7.248	46.4	46.36	Arcillo Limoso	6.53	3.58	0.16	16.55	148.93	0.26	3.26	17.89	13.45	0.98	2.51	0.95	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
4	S2326	TULUMAYO	21.25	36.4	42.36	Frango Arcillo Limoso	7.12	2.43	0.11	12.69	78.97	0.25	3.27	16.44	11.13	1.33	2.69	1.29	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
5	S2327	TULUMAYO	33.25	20.4	46.36	Frango	6.20	1.98	0.09	18.55	70.47	0.33	2.39	26.50	19.79	2.05	3.17	1.49	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
6	S2328	TULUMAYO	47.25	20.4	32.36	Frango	6.64	2.49	0.11	11.69	32.49	0.33	3.89	24.85	17.82	1.40	3.89	1.74	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
7	S2329	TULUMAYO	19.25	38.4	42.36	Frango Arcillo Limoso	6.66	3.84	0.17	12.15	63.97	0.31	4.78	33.41	25.40	2.48	2.95	2.58	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
8	S2330	TULUMAYO	15.25	32.4	52.36	Frango Arcillo Limoso	6.63	3.20	0.14	12.15	151.43	0.30	3.64	22.48	16.45	1.28	2.45	2.30	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
9	S2331	TULUMAYO	15.25	28.4	56.36	Frango Arcillo Limoso	6.62	2.24	0.10	11.92	88.96	0.24	3.37	23.09	16.13	1.15	2.63	3.18	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
10	S2332	TULUMAYO	19.25	36.4	44.36	Frango Arcillo Limoso	6.38	1.92	0.09	20.56	61.97	0.29	4.68	29.71	20.79	1.80	3.93	3.18	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
11	S2333	TULUMAYO	19.68	37.0	43.28	Frango Arcillo Limoso	6.38	3.20	0.16	13.04	105.00	0.29	3.24	22.42	16.45	1.28	1.48	2.30	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			
12	S2334	TULUMAYO	19.68	39.0	41.28	Frango Arcillo Limoso	6.66	2.40	0.11	11.52	103.00	0.26	3.37	20.79	16.13	1.15	1.75	2.98	----	----	----	----	100.00	0.00	0.00			

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
PROYECTO 101 – FONDECYT
TINGO MARIA 13 DE FEBRERO 2018



Ing. Liza C. Mansilla Minaya
JEFE

Cuadro 21. Matriz de correlación entre el Cd, Pb y micronutrientes de las semillas de cinco clones de cacao de diferente origen genético

ELEMENTO	Cd	Pb	Zn	Fe	Cu	Mn
Cd	1					
Pb	0.124	1				
Zn	-0.666**	0.18	1			
Fe	0.056	-0.005	0.655**	1		
Cu	-0.531**	0.629**	0.869**	0.439*	1	
Mn	0.365*	0.276	0.355	0.755**	0.303	1

Cuadro 22. Caracterización organoléptica de la semilla fresca de cinco clones de cacao.

Clon	Sabores básicos				Sabores específicos		Observaciones
	Dulzura	Acidez	Astringencia	Amargor	Floral	Frutal	
S-12	3	2	2	3	3	2.5	Frutas: mandarina + aguaymanto.
S-23	1	1	1	3.5	3	3	Aromas: lavanda + jazmín.
C-60	1	1	2	3.5	2	3	Frutas: anona + melocotón + plátano de seda.
S-08	3	2.5	2.5	3	3.5	3	Aroma: jazmín. Frutas: mandarina + plátano isla
S-28	2	2	2	3.5	2	2.5	Frutas: plátano de isla + anona

Fuente: Elaboración propia.



Figura 14. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-8)



Figura 15. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-12)



Figura 16. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-23)



Figura 17. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon S-28)



Figura 18. Fotografía de la planta, fruto y hojas de cacao (Clon C- 60)