

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**IMPACTO DE PRODUCTOS BIODEGRADABLES APLICADOS
AL SUELO SOBRE LA ACUMULACIÓN DE CADMIO EN
CACAO (*Theobroma cacao* L.)**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

ERICK EDINSON DIONISIO FLORES

LIMA – PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**IMPACTO DE PRODUCTOS BIODEGRADABLES APLICADOS
AL SUELO SOBRE LA ACUMULACIÓN DE CADMIO EN
CACAO (*Theobroma cacao* L.)**

ERICK EDINSON DIONISIO FLORES

Tesis para optar el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Raúl Humberto Blas Sevillano
PRESIDENTE

Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa
ASESOR

Ing. M. S. Luis Rubén Bazán Tapia
MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Luis Rodrigo Tomassini Vidal
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Con mucho cariño para la memoria de mi abuelito
Alejandro Flores Pomasunco que me cuida desde el cielo.

Y para toda la hermosa familia que tengo:
Mis padres Agustín Dionisio Jinés y Edit Flores Antonio,
mi hermana Joyci Dionisio Flores y mi sobrino Darío Espíritu Dionisio.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Agustín Dionisio y Edit Flores por el enorme sacrificio que hicieron por mi educación. Por todo el apoyo y la confianza que siempre me dieron en todos los aspectos de mi vida, por las enseñanzas en valores, la humildad, perseverancia y motivación que complementan en principios mi formación profesional. Les estaré eternamente agradecido.

Al Dr. Oscar Loli Figueroa por todas las enseñanzas brindadas a lo largo de los cursos universitarios que lleve con él, por el apoyo en el proceso de esta investigación, el tiempo, la paciencia, la predisposición y los consejos que siempre me ha dado.

Al Sr. Giuliano Grimaldi, gerente general de la empresa Avibiol, por la confianza que tuvo en mi persona. Por la predisposición para realizar investigación, por las facilidades brindadas a lo largo del proyecto y los consejos.

Al Sr. Mario, trabajador del laboratorio de fertilidad de suelos, por todo el apoyo brindado, su predisposición para ayudar y su buen ánimo.

A los grandes amigos que estuvieron a lo largo de todo este proceso, en especial a: Yuleysi Aguilar Silva por todo el apoyo, motivación, enseñanzas y consejos, Carlos Mestanza por todas las enseñanzas e inspiración que transmite, a mis amigos de laboratorio Cesar Padilla, Giorgio Cruz y Fernando Chung por los consejos y anécdotas que pasamos.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina y a toda la plana docente de la facultad de Agronomía, por todas las enseñanzas brindadas que contribuyeron a mi formación profesional, orgulloso de ser parte de esta familia.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. El cultivo de cacao.....	3
2.1.1. Taxonomía.....	3
2.1.2. Botánica y descripción de la planta.....	3
2.1.3. Requerimientos del cultivo.....	6
2.2. Cadmio.....	6
2.2.1. Descripción general.....	6
2.2.2. Cadmio en el suelo.....	7
2.2.3. Factores que afectan su disponibilidad.....	9
2.2.4. Ingreso, transporte y acumulación de cadmio en las plantas.....	10
2.3. El cadmio (Cd) en el cultivo de cacao.....	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Características del sitio experimental.....	13
3.1.1. Ubicación.....	13
3.1.2. Suelo.....	13
3.1.3. Condiciones climáticas.....	14
3.1.4. Cultivo.....	14
3.2. Materiales.....	15
3.2.1. Implementos y equipos.....	15
3.2.2. Productos comerciales empleados.....	16
3.2.3. Cadmio en los productos comerciales empleados.....	19

3.3. Metodología	20
3.3.1. Variables a evaluar	21
3.3.2. Procedimientos	22
3.4. Diseño estadístico	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	25
4.1. Análisis de desarrollo radicular.....	25
4.2. Análisis de productividad.....	27
4.2.1. Efecto de los tratamientos sobre el número de mazorcas	27
4.2.2. Efecto de los tratamientos sobre el peso seco de almendras	28
4.2.3. Efecto de los tratamientos sobre la cosecha acumulada	30
4.3. Análisis de extracción de cadmio	31
4.3.1. Efecto de los tratamientos en la acumulación de cadmio en el mes de marzo	31
4.3.2. Efecto de los tratamientos sobre la acumulación de cadmio en el mes de junio..	32
4.3.3. Evaluaciones complementarias de la concentración de cadmio en almendra...36	
4.4. Análisis de correlación entre las variables evaluadas	37
4.4.1. Relación entre la concentración de cadmio y la concentración de calcio....37	
4.4.2. Relación entre el desarrollo radicular con la cosecha y la concentración de cadmio.	38
V. CONCLUSIONES.....	41
VI. RECOMENDACIONES.....	42
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
VIII. ANEXOS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del cadmio	7
Tabla 2. Características fisicoquímicas del suelo utilizado en el experimento.....	14
Tabla 3. Contenido de cadmio en las diferentes mazorcas de cacao.....	15
Tabla 4. Concentraciones de cadmio (ppm) en los productos utilizados en el experimento	19
Tabla 5. Factores en estudio con sus respectivas dosificaciones.....	20
Tabla 6. Dosificación de los productos en cada tratamiento	21
Tabla 7. Peso seco de raicillas de cacao al final de la cosecha.....	26
Tabla 8. Número de mazorcas sanas entre los meses de febrero y mayo	28
Tabla 9. Peso de 30 almendras cosechadas en los diferentes tratamientos aplicados.....	29
Tabla 10. Cosecha acumulada desde abril hasta junio en los diferentes tratamientos.....	30
Tabla 11. Contenido de cadmio (ppm) en las mazorcas en pleno desarrollo evaluadas en el mes de marzo.....	31
Tabla 12. Contenido de cadmio (ppm) en los tres componentes de la mazorca evaluados en el mes de junio	34
Tabla 13. Evaluaciones complementarias de concentración de cadmio en almendra para el mes de mayo y concentración de cadmio en grano para el mes de junio.....	36
Tabla 14. Coeficiente de correlación de la concentración de cadmio y la concentración de calcio en los meses de mayo y junio	38
Tabla 15. Coeficiente de correlación del peso de raicillas, peso seco de cosecha para el mes de dicha evaluación con la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fracciones de cadmio y biodisponibilidad en suelos.....	8
Figura 2. Peso seco de raicillas de cacao al final de la cosecha	26
Figura 3. Peso seco de 30 almendras cosechadas en los diferentes tratamientos aplicados.....	29
Figura 4. Peso seco de la cosecha acumulada en los diferentes tratamientos aplicados.....	33
Figura 5. Concentración de cadmio en los tres componentes de la mazorca para el mes de junio.....	34
Figura 6. Relación entre la concentración de cadmio y la concentración de calcio presentes en la almendra cosechada en el mes de mayo.	37
Figura 7. Relación entre la concentración del peso seco de la cosecha acumulada y el peso seco de raicillas totales.....	39
Figura 8. Relación entre la concentración de cadmio en almendra y el peso seco de raicillas totales.	40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Croquis de la distribución de los tratamientos en el campo experimental..	50
Anexo 2. Desarrollo radicular en los diferentes tratamientos.....	51
Anexo 3. Desarrollo radicular en diferentes dosis de los productos.....	52
Anexo 4. Número de mazorcas totales y sanas evaluadas entre los meses de febrero y mayo en los diferentes tratamientos aplicados	53
Anexo 5. Número de mazorcas sanas en diferentes dosis de los productos.	54
Anexo 6. Análisis de varianza del peso seco de 30 almendras cosechadas en los diferentes tratamientos aplicados.....	55
Anexo 7. Peso seco de 30 almendras y cosecha acumulada en diferentes dosis de los productos.	55
Anexo 8. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) para el mes de marzo en los diferentes tratamientos aplicados.....	56
Anexo 9. Contenido de cadmio en el mes de marzo en diferentes dosis de los productos..	57
Anexo 10. Número de mazorcas extraídas en las cuatro cosechas entre abril y junio	58
Anexo 11. Concentración de cadmio en las diferentes evaluaciones realizadas.....	59
Anexo 12. Análisis de varianza de la concentración de cadmio en los componentes de la mazorca: cascara, cascarilla con mucilago y almendra, para el mes de marzo.	60
Anexo 13. Contenido de cadmio en el mes de junio en diferentes dosis de los productos..	61
Anexo 14. Distribución espacial de la concentración de cadmio en almendras cosechadas en los diferentes tratamientos para el mes de mayo.....	62
Anexo 15. Distribución espacial de la concentración de cadmio en almendras cosechadas en los diferentes tratamientos para el mes de junio	62
Anexo 16. Análisis de varianza de la concentración de cadmio en almendras cosechadas en las evaluaciones complementarias en los meses de mayo y junio.	63
Anexo 17. Análisis de regresión entre la variable concentración de cadmio y concentración de calcio para el mes de mayo.	63

Anexo 18. Análisis de varianza entre la variable concentración de cadmio y concentración de calcio para el mes de mayo.	64
Anexo 19. Análisis de regresión entre la variable peso seco de raicillas totales y peso seco de la cosecha acumulada.	64
Anexo 20. Análisis de varianza entre la variable peso seco de raicillas totales y peso seco de la cosecha acumulada.	64
Anexo 21. Análisis de regresión entre la variable peso seco de raicillas totales y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.....	65
Anexo 22. Análisis de varianza entre la variable peso seco de raicillas totales y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.....	65
Anexo 23. Análisis de regresión entre la variable peso seco cosechado y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.....	66
Anexo 24. Análisis de varianza entre la variable peso seco cosechado y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio..	66
Anexo 25. Análisis de regresión entre la variable concentración de calcio y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio..	67
Anexo 26. Análisis de varianza entre la variable concentración de calcio y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.....	67

RESUMEN

El cadmio (Cd) es un metal pesado tóxico y dañino en los seres humanos. Su capacidad de bioacumulación, así como el constante ingreso de cadmio al sistema incrementa la concentración en los suelos. Las almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) acumulan a este metal, por ello, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de productos biodegradables aplicados al suelo sobre la acumulación de cadmio en la mazorca de cacao y el impacto sobre la productividad de almendras. Se probaron dos dosificaciones de los siguientes productos: Avibiol (120 L.ha⁻¹ y 240 L.ha⁻¹), carbón líquido Monty's (8 L.ha⁻¹ y 16 L.ha⁻¹) y Avical (sin Avical y 20 L.ha⁻¹), teniendo como constantes una dosificación de Codahumus 20 (8 L.ha⁻¹) y E-codargón (20 L.ha⁻¹) en todos los tratamientos, adicionalmente un testigo sin la aplicación de ningún producto, generándose así, ocho tratamientos más el tratamiento testigo, dispuestos en un Diseño de Bloques Completos al Azar. Los resultados indican un incremento significativo en el peso seco de raicillas activas por el efecto de todos los productos aplicados en su mayor dosificación (obteniéndose 215.8 g. m⁻³ con el tratamiento 8 a diferencia del testigo con 120.0 g. m⁻³). La productividad también se vio favorecida con la aplicación de los productos, mostrando diferencias significativas en la cosecha de almendras con la aplicación de todos los productos en su mayor dosificación (obteniéndose 1112.83 kg.ha⁻¹ en el tratamiento 8 a diferencia del testigo con 814 kg.ha⁻¹). En cuanto a la extracción de cadmio, no se encontraron diferencias significativas en las evaluaciones realizadas; sin embargo, se muestra una tendencia a la disminución de la concentración del cadmio en el cacao con la aplicación de los productos probados.

Palabras clave: cadmio, cacao, productos biodegradables, desarrollo radicular, rendimiento

ABSTRACT

Cadmium (Cd) is a toxic heavy metal which is harmful to humans. Its bioaccumulation capacity, as well as the constant entry of cadmium into the system, increases its concentration in soils. Cocoa almonds (*Theobroma cacao* L.) accumulate this metal, therefore, the objective of this research was to evaluate the effect of biodegradable products applied to the soil on the accumulation of cadmium in the cocoa pod and the impact on productivity of almonds. Two dosages of the following products were tested: Avibiol (120 L.ha⁻¹ and 240 L.ha⁻¹), Monty's liquid carbon (8 L.ha⁻¹ and 16 L.ha⁻¹) and Avical (without Avical and 20 L.ha⁻¹), having as constants a dosages of Codahumus 20 (8 L.ha⁻¹) and E-codargón (20 L.ha⁻¹) in all treatments, additionally a control without the application of any product, generating thus, eight treatments plus the control were arranged in a Randomized Complete Block Design. The results indicate a significant increase in the active rootlets dry weight due to the effect of all the products at the highest dosage (obtaining 215.8 g. m⁻³ with treatment 8 in comparison with the control which reached 120.0 g. m⁻³). The productivity was also favored with the application of the products, showing significant differences in the harvest of almonds with the application of all the products at the highest dosage (obtaining 1112.83 kg.ha⁻¹ with treatment 8 in contrast to the control with 814 kg.ha⁻¹). Regarding the cadmium extraction, no significant differences were found. Nonetheless, a decreasing tendency of cadmium concentration in cocoa is shown with application of the tested products.

Key words: cadmium, cocoa, biodegradable products, root development, yield

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao en los últimos años ha tomado una gran importancia en la agroexportación, siendo este uno de los cultivos de mayor difusión como alternativas al cultivo de la hoja de coca. El cacao producido en el Perú, presenta características que son muy aceptadas en el mercado internacional, tal es el caso del cacao orgánico, ya que es el segundo productor de cacao orgánico, después de República Dominicana, según la organización internacional de cacao (ICCO). La producción nacional de cacao ha tenido un crecimiento anual del 10 por ciento en los diez últimos años, esto debido al aumento del rendimiento y al incremento de áreas cultivadas de cacao, registrándose 125 522 hectáreas para el 2016 a comparación de las 77 192 hectáreas en el 2010 (OEE-Minagri, 2018). Parte de este efecto ha repercutido en la actividad laboral pues es el sustento para muchos agricultores y personas relacionadas a la agricultura, según Mendoza (2017), gerente de la asociación peruana de productores de cacao (Appcacao), en el 2016 se generaron 9,9 millones de jornales, beneficiando de manera directa a 90 000 familias e indirecta a 450 000 personas, principalmente de la selva.

De acuerdo a los datos de Trade Map (2018) el 90 por ciento de la producción del cacao peruano está destinada a la exportación, llegando a exportar un valor de 293.2 millones de dólares en el 2016, considerando al grano de cacao y sus derivados o preparaciones. Los principales destinos de las exportaciones son Europa, principalmente Países Bajos, Bélgica, Alemania, Italia y Suiza, así como Estados Unidos y Canadá. El principal mercado para el cacao peruano es Europa ya que comprende aproximadamente 62% del total de las exportaciones (Trade Map, 2018), es por ello que este producto exportado debe satisfacer los aspectos de calidad organoléptica que demanda el mercado, además de garantizar un producto sano y saludable cumpliendo con todos los requisitos de la legislación europea.

Según la CAOBISCO et al. (2015), las principales fuentes de preocupación de la industria del cacao en cuanto a seguridad alimentaria son: los alérgenos, las dioxinas y PBCs, las bacterias, las materias extrañas, infestaciones, hidrocarburos, mico toxinas, residuos de

plaguicidas y los metales pesados. Los metales pesados, en las últimas décadas, se han convertido en motivo de preocupación a nivel mundial ya que la exposición a elevadas concentraciones puede causar problemas en la salud de los seres humanos. Es por ello que la Unión Europea ha fijado límites máximos del contenido de cadmio para el chocolate y los productos derivados de cacao. El reglamento UE de la comisión No. 448/2014 que modifica el reglamento CE No. 1881/2006 entró en vigor el 1 de enero del 2019 (UE, 2014) y con ello podría amenazar las exportaciones de algunos países, especialmente los países en desarrollo, que son los mayores exportadores de cacao.

Este problema de un nivel elevado de cadmio en los granos es afectado por varios factores entre ellos el carácter fisicoquímico del suelo, el contenido de materia orgánica, la variedad cultivada de cacao y distintos factores antropogénicos, entre los que destaca el empleo de fertilizantes contaminados. La investigación científica se centra ahora en la elucidación de estos factores, con el objetivo de mitigar la absorción de cadmio.

Mediante esta investigación se pretende brindar una alternativa a fin de contrarrestar la absorción de cadmio mediante la aplicación de productos comerciales líquidos, donde se espera no solo disminuir la absorción del metal en estudio, sino también tener un efecto favorable en la productividad, teniendo así una práctica sostenible y aplicable.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Evaluar el efecto de los productos aplicados al suelo sobre la acumulación de cadmio en cacao y el impacto que puede tener sobre el rendimiento.

Objetivos específicos:

- Determinar el efecto de la aplicación de los productos biodegradables en prueba sobre la acumulación de cadmio en los componentes de la mazorca.
- Determinar el efecto de la aplicación de los productos biodegradables en prueba sobre el desarrollo radicular de las plantas de cacao.
- Determinar efecto de la aplicación de los productos biodegradables en prueba sobre el rendimiento de las plantas de cacao.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de cacao

2.1.1. Taxonomía

Especie: *Theobroma cacao* L.

Familia: Malvaceae

2.1.2. Botánica y descripción de la planta

El cacao es un árbol que presenta como otras especies tropicales un marcado dimorfismo de ramas, tiene porte bajo alcanzando una altura promedio de 5 metros, sin embargo, cuando crece bajo sombra intensa puede llegar a alcanzar alturas de hasta 20 metros (Gutiérrez, 2011). Es caulífero y semi-caducifolio (Duke citado por Medina et al., 2009).

a. Raíces:

El tipo de sistema radicular del cacao depende también de la clase de propagación. En una planta proveniente de semilla hay una raíz principal o pivotante, que alcanza hasta 2 metros de longitud, y varias raíces axiales, que se ramifican superficialmente y miden hasta 3 o 5 metros de largo. Las raicillas alimentadoras proliferan cerca de la superficie hasta 2 metros de profundidad y forman una masa compacta. En las plantas de propagación clonal no hay raíz pivotante sino varias principales, con una mayor cantidad de raicillas alimentadoras cerca de la superficie (León, 1987).

b. Tallo

El tronco que presenta es recto generalmente, aunque puede desarrollarse de formas muy variadas, según las condiciones ambientales (Gutiérrez, 2011). Presenta ramas dimórficas, unas de crecimiento vertical hacia arriba, denominadas ramas de crecimiento ortotrópico y otras son de crecimiento oblicuo hacia afuera, denominadas ramas de crecimiento plagiotrópico. Las plantas de cacao, reproducidas por semillas, desarrollan un tallo principal de crecimiento vertical que puede alcanzar de 1 a 2 metros de altura, a partir

de ese momento la yema apical detiene su crecimiento y del mismo nivel emergen de tres a cinco ramas laterales. A este conjunto de ramas se llama comúnmente verticilio u horqueta (Batista, 2009).

c. Hoja

Las hojas de la planta son de forma alargada, medianas y de color verde, algunas plantas tienen las hojas tiernas y de diferentes colores que pueden ser: café claro, verde pálido, morados o rojizos, según el ecotipo. La hoja está unida a la rama por el pecíolo, donde se encuentra un abultamiento llamado yema que origina ramas (Gutiérrez, 2011). La lámina de la hoja, es oblonga a lanceolado-oblonga, mide de 10 a 20 cm de largo y de 5 a 12 cm de ancho; tiene el ápice muy acuminado y el margen entero y ondulado (León, 1987).

d. Inflorescencia

Las inflorescencias o cojines aparecen solo en el tronco y ramas principales, fenómeno denominado caulifloria, que se presenta en numerosas especies tropicales; los cojines ocupan posiciones axilares a las hojas. El cojín puede alcanzar dimensiones considerables, apareciendo como masas hemisféricas de 2 o 3 centímetros de diámetro. No es raro que un cojín forme sucesivamente hasta 20 o 60 flores. Hay varias especies de insectos que viven en las grietas de los cojines y que parecen tener algún papel en la polinización (León, 1987).

e. Flor

La flor individual tiene un pedicelo largo y fino, de 1 a 1.5 cm de longitud. Al final hay tres o siete, normalmente cinco sépalos agudos y rosados, de 6 a 8 milímetros de largo, pubescentes, en la flor abierta se expanden formando ángulo recto con el pecíolo. La corola consiste en cinco pétalos blancos, de 6 a 8 milímetros de largo. El centro de la flor lo ocupa el tubo estaminal, compuesto por cinco estambres fértiles, cortos y doblados hacia afuera, cada uno encerrado en la concha de un pétalo, y de cinco estaminodios internos, agudos y largos, de posición erecta. Los estambres fértiles tienen dos anteras con dos sacos polínicos cada una. El ovario es un cuerpo ovoide, supero, con cinco celdas y placentación central, con 30 a 50 óvulos (León, 1987).

Del gran número de flores que produce el cacao menos del cinco por ciento es fecundado y llega a dar fruto, lo que se debe a dos factores: primero es muy frecuente que la planta sea autoincompatible y por lo tanto necesite de polen extraño; segundo, los mecanismos de

polinización son muy poco eficientes. Las flores que no han sido fertilizadas caen al segundo o tercer día; en las que han sido fecundadas se desprenden los sépalos, pétalos y estambres y el ovario inicia su crecimiento. Muchos de los ovarios fecundados caen por diversas causas y solo un porcentaje muy bajo llega a la maduración (León, 1987).

f. Fruto

El fruto de cacao es el resultado de la maduración del ovario de la flor fecundada. Dentro de su clasificación botánica el fruto de cacao es una drupa, normalmente conocido como “mazorca” (Batista, 2009). En la mayoría de los frutos hay cinco prominencias secundarias, alternando con las primarias a veces igualmente desarrolladas, de modo que el fruto presenta 10 aristas regulares. Los colores básicos del fruto maduro son amarillo claro o rojo oscuro (León, 1987).

En corte transversal se distinguen en la cáscara del fruto primero el exocarpo, grueso y carnoso, luego el mesocarpo como una capa muy angosta y dura; el endocarpo es suave, cuyo grosor varía según el cultivar. El exocarpo está formado de epidermis con muchos estomas; debajo están unas 12 capas de parénquima en que hay estratos con pigmentos y grupos de cristales de oxalato de calcio; la parte central del exocarpo se compone de parénquima lacunoso e incoloro, recorrido por canales de mucilago y haces vasculares. El mesocarpo es duro y angosto, formado de esclerénquima. El endocarpo se compone de parénquima más compacto con haces vasculares; la epidermis interna es fuerte y lisa (León, 1987).

La duración del desarrollo del fruto es de 150 a 180 días hasta que está totalmente maduro y depende principalmente del cultivar y la procedencia (Dostert et al., 2011). Bridgemohan et al. (2016) describe dos estados en el crecimiento de la mazorca en la fenología en escala BBCH. El primer estado como fase de desarrollo y el segundo estado como fase de maduración. La fase de desarrollo como explican Roth & Lindorf (1971) comienza primero por un desarrollo del pericarpio del fruto que originará la mazorca, para luego aumentar en tamaño los lóculos; el tegumento se desarrolla primero en la semilla y está compuesto también por parte de la epidermis interna del pericarpio. En una mazorca madura la cáscara se presenta más delgada que en etapas más jóvenes, ya que su parte interna se transforma en la pulpa que recubre los granos.

2.1.3. Requerimientos del cultivo

El árbol de cacao se cultiva en las regiones tropicales. Es comercialmente cultivada entre 15° al norte y 15° al sur de la línea ecuatorial. Sin embargo, se puede encontrar hasta las latitudes subtropicales entre 23°26' (límite del trópico de Cáncer) al norte y 23°26' (límite del trópico de Capricornio) al sur de la línea ecuatorial. El rango de temperatura promedio anual va de 23° a 30°C, siendo óptimo de 25°C (Gómez et al., 2014). Se cultiva desde el nivel del mar hasta los 1200 msnm, siendo el óptimo de 500 a 800 msnm. Asimismo, necesita humedad relativa anual promedio de entre 70 y 80 por ciento (Romero, 2016).

La precipitación pluvial mínima y máxima manejable es de 1400 y 3000 mm, respectivamente y óptima de 1500 a 2500 mm, con alto grado de distribución a lo largo del ciclo. Presenta baja tolerancia al déficit de agua y en los meses con menos de 100 mm se genera déficit hídrico, lo que afecta principalmente la floración y el brote de hojas (Romero, 2016). Un adecuado régimen hídrico es muy importante, las mazorcas que se desarrollan durante la estación seca suelen tener granos más pequeños que las desarrolladas durante la estación húmeda, se ha observado una correlación entre la precipitación durante los 2 a 3 primeros meses de desarrollo de la mazorca y el peso medio de los granos, además del contenido de grasa, cuyo porcentaje disminuye en condiciones secas (CAOBISCO et al., 2015).

El tipo de suelo favorable para el crecimiento del cacao, al contar este cultivo con una raíz primaria que crece verticalmente hacia abajo, requiere de suelos profundos con buen drenaje, libre de acumulación de hierro, con alto contenido de nutrientes y un suelo rico en materia orgánica (Medina et al., 2009).

2.2. Cadmio

2.2.1. Descripción general

Es un metal del grupo IIB de la tabla periódica, con número atómico 48, peso atómico 112.4, densidad 8.65 gr/cm^3 (20°C) y con un estado de oxidación (II) (Tabla 1). Las características más remarcables del cadmio son su gran resistencia a la corrosión, su bajo punto de ebullición y su excelente conducción eléctrica. Los compuestos de cadmio presentan una gran resistencia a los compuestos químicos y a las altas temperaturas (García, 2002).

Tabla 1: Propiedades del cadmio (García, 2002)

Símbolo químico	Cd
Forma	Blanco, metal suave
Características	Maleable, dúctil y flexible
Punto de fusión	321 °C
Punto de ebullición	765 °C
Numero atómico	48
Peso atómico	112.41
Densidad	8.65 <i>gr/cm</i> ³

2.2.2. Cadmio en el suelo

El contenido de cadmio del suelo se puede dividir en tres fracciones anidados en función a la biodisponibilidad: cadmio no intercambiable, intercambiable y en la solución de suelo (Meter et al., 2019) (Figura 1). La fracción no intercambiable representa al cadmio que no está disponible y es poco probable que pase a la fracción intercambiable o a solución, ya que está como parte estructural de los minerales o también formando compuestos precipitados. La fracción intercambiable está compuesta por los iones de cadmio adheridos en los coloides del suelo como la materia orgánica, óxidos metálicos hidratados y partículas de arcilla, los cuales están potencialmente disponibles para la planta (Shahid et al., 2016). La fracción en la solución del suelo está compuesta por iones de cadmio libres y totalmente disueltos (Cd^{+2} , CdCl^+ , CdHO_3^+ , Cd en ligandos orgánicos) listos para ser absorbidos por la planta (Loganathan et al., 2012).

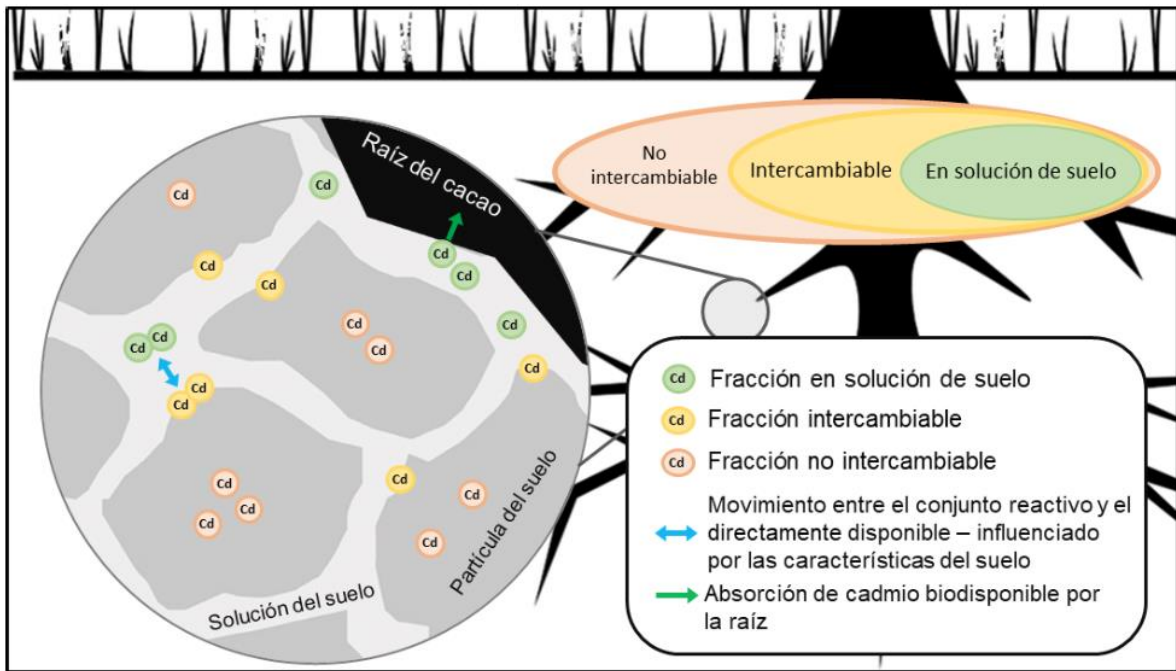


Figura 1: Fracciones de cadmio y biodisponibilidad en suelos (Meter et al., 2019)

Las principales variaciones en el contenido de cadmio en el suelo se deben a la composición de la roca madre y al suministro de metales que provienen de químicos, pesticidas y la contaminación atmosférica (Abanto, 2016). El cadmio como catión divalente (Cd^{+2}) es retenido fácilmente por la arcilla y la materia orgánica (Solís, 2014), su solubilidad se encuentra relacionada con el azufre, es soluble en estados oxidados como sulfato de cadmio y bajo condiciones de reducción precipita como sulfuro de cadmio (Chen, 2000). Este metal pesado se pierde del suelo o resulta inaccesible para la planta como consecuencia de la lixiviación, extracción de los cultivos, o por reacción con los minerales o elementos del suelo, especialmente bajo condiciones de suelos calcáreos (Abanto, 2016), aun cuando se ha encontrado a nivel experimental que es el calcio el que tiende a reducir el efecto del cadmio (Cuenca, 2012).

La concentración habitual de cadmio en los suelos es de 0.07 a 1.1 mg/kg. En áreas contaminadas, como por ejemplo campos de arroz en ciertas regiones de Japón, se han detectado concentraciones entre 1 a 69 mg/Kg. Por otro lado, la concentración de Cd en la solución de suelo es relativamente baja y ronda 0.2-6 $\mu\text{g/L}$. Valores de 300-400 $\mu\text{g/L}$ se corresponden a suelos contaminados (Sánchez, 2016). Entre las acciones antropogénicas de contaminación de cadmio (Cd), Cárdenas (2012) menciona a las emisiones atmosféricas originadas a partir de minas metalúrgicas, incineradoras municipales y emisiones

industriales; los depósitos directos tales como lodos procedentes de aguas residuales utilizados en la agricultura; los fertilizantes principalmente los fertilizantes fosfatados producidos a partir de la roca fosfórica, constituyendo la mayor entrada agrícola de cadmio al suelo, por último la contaminación accidental por procesos industriales, residuos de minería y corrosión de estructuras galvanizadas.

2.2.3. Factores que afectan su disponibilidad

La absorción de cadmio, por parte del cultivo depende críticamente de diferentes factores del suelo, entre los que se podría indicar según Cárdenas (2012):

- La acidez del suelo: su mayor absorción se encuentra fuertemente relacionada con la acidez.
- Contenido de cadmio en el suelo: a mayor contenido de cadmio hay mayor absorción de este elemento por la planta.
- Temperatura del suelo: a mayor temperatura mayor absorción porque hay mayor velocidad de reacciones y mayor solubilidad.
- Unión de minerales del suelo: a mayor unión menor absorción de cadmio.
- Contenido de humus en el suelo: a mayor humus mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC) por lo que habría menor cadmio en solución, lo que permite menor absorción.

Además de los factores ya mencionados se podría sumar la conductividad eléctrica del suelo, potencial redox, textura, contenido de macro y micronutrientes y la presencia de microorganismos (Adriano, 2001). La suma de estos factores afecta las características físicas y químicas del cadmio en el suelo y pueden fluctuar en el espacio y tiempo (Meter et al., 2019).

La interacción de estos múltiples factores que existe en el suelo, hace compleja la determinación de cuales pueden llegar a ser más determinantes para la biodisponibilidad del cadmio. Es así, que existen numerosos autores que muestran al pH como principal factor para la movilidad, solubilidad y por lo tanto la biodisponibilidad del cadmio en el suelo (Adriano, 2001; Basta et al., 2005; Buekers et al., 2007; Degryse et al., 2009; Kabata-Pendias y Pendias, 2001) donde el incremento del pH disminuye la concentración de cadmio en solución; sin embargo, el entorno de pH en el suelo no es uniforme ya que las plantas exudan ácidos de sus raíces para mejorar la solubilidad de nutrientes (Dong et al., 2007), es así, que se puede observar también problemas en suelos con pH neutro y alcalino. Se han encontrado

problemas con cadmio en suelos con pH casi neutro en el norte del Perú (Remigio, 2015), así como, en Ecuador, Chávez et al. (2016) reportó una correlación positiva entre el cadmio disponible y el pH.

Este efecto variable del pH se puede explicar por las diversas interacciones dentro del sistema suelo, Argüello et al. (2019) indica que existe una correlación negativa entre el pH del suelo y la biodisponibilidad del cadmio; sin embargo, a medida que la cantidad del cadmio total del suelo se incrementa, la correlación negativa entre ambas variables disminuye.

La materia orgánica cumple un papel importante en la biodisponibilidad del cadmio debido a su capacidad para adsorber el cadmio por su alta capacidad de intercambio catiónico, el incremento de la actividad microbiológica, así como su capacidad quelante (Adriano, 2001). Bravo et al. (2014) sostiene que la calidad de la materia orgánica tiene un efecto significativo en la biodisponibilidad del cadmio, siendo los ácidos húmicos los principales componentes en la retención de cadmio, formando enlaces fuertes en sus grupos carboxilos y fenólicos, con mayor capacidad y fuerza de retención que el resto de fases adsorbentes

2.2.4. Ingreso, transporte y acumulación de cadmio en las plantas

Aunque el cadmio es un elemento no esencial, el índice de factor de bioacumulación (relación del nivel de cadmio en la planta con respecto al nivel de cadmio en el suelo) es alto y puede superar al de muchos nutrientes esenciales (Gonçalves et al., 2009). En el cultivo de cacao, Argüello et al. (2019) reportó un factor de transferencia de 1.6, relacionando al cadmio encontrado en la almendra y el cadmio contenido en el suelo; haciéndolo peligroso por su alta afinidad a las plantas.

Al ser un elemento no esencial, no posee una vía de entrada específica, es por ello que ingresa a la planta principalmente a través de la absorción accidental de las raíces mediante procesos específicos y no específicos utilizados para iones como Fe^{+2} , Ca^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} y Mn^{+2} (Shahid et al., 2016). Se ha descrito que el cadmio puede entrar a la raíz a través de diferentes transportadores como: los pertenecientes a la familia transportadora ZIP (familia de transportadores metálico ZIP) responsables de la absorción de Cd^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} y Zn^{+2} , la familia de transportadores NRAMP con un alto rango de sustratos (Al, Co, Mn, Ni, Pb y Zn), los transportadores específicos de calcio (LCT1) y hierro (IRT1) (Krämer, 2010).

Dentro de la planta el cadmio coordina con un ligando como fitoquelatinas (PC) que contiene azufre, glutatión (GSH) en el citosol y metalotioneínas (MT), para luego ser transportados

al interior de la vacuola o a otras células (Dal Corso et al., 2008). El movimiento del cadmio hasta los tejidos aéreos se produce a través del xilema mediante la carga de transpiración con transporte simplástico (formando complejos) y/o apoplástico (Clemens, 2006). El papel de la transpiración en la movilidad del cadmio ha sido estudiado por Kranner y Colville (2011) quienes encontraron que el contenido de cadmio en la semilla era diferente para dos cultivares de arroz que tenían diferentes tasas de transpiración. El cadmio se transloca con el agua que fluye a través del sistema vascular hacia las hojas, donde el agua se evapora y el cadmio se acumula (Krzyszowska et al., 2010). En condiciones generales Benavides et al. (2005) sostienen que la concentración de cadmio en el tejido de la planta disminuye a partir de las raíces, tallos, hojas, cáscaras de las mazorcas y semillas.

Esta acumulación de cadmio, en elevadas concentraciones, puede llegar a ser perjudicial para el desarrollo de las plantas; cabe resaltar que, el umbral de concentraciones es significativamente variable entre especies y aun así dentro de las plantas de la misma especie (genotipos) (Meter et al., 2019). Según He et al. (2017), las plantas pueden mostrar signos de toxicidad cuando la concentración de cadmio en el suelo supera los 8 mg/kg, la concentración de cadmio biodisponible supera los 0.001 mg/kg o la concentración de cadmio en el tejido de la planta alcanza valores entre 3-30 mg/kg.

2.3. El cadmio (Cd) en el cultivo de cacao

La problemática del cadmio en el cultivo de cacao viene afectando en mayor grado a los agricultores de los países de Latinoamérica y el Caribe (LAC), tal como nos muestra Meter et al. (2019) donde a comparación de países productores de los continentes de Asia y África, en LAC se tiene los mayores valores de concentración de cadmio en almendra y además la mayor variabilidad. Los estudios en Ecuador por parte de Argüello et al. (2019) muestran altas variaciones en el contenido de cadmio en granos de cacao en múltiples niveles como provincias, regiones, cantones e incluso dentro de las fincas evaluadas.

La misma variabilidad se observa en los datos obtenidos a nivel de tejidos evaluados, donde se han reportado en Perú bajas concentraciones de cadmio en hoja en Cusco de 0.23 ppm (Arévalo et al., 2017), hasta concentraciones elevadas como 19.5 y 18.89 ppm en el sector Platanal bajo en Piura y en el sector San Jacinto en Tumbes respectivamente (Remigio, 2015), mientras que en la localidad de Yacopi en Colombia, Rodríguez (2017) ha reportado 70.4 ppm de cadmio en hoja, el más alto informado hasta el momento. Si bien hay estudios publicados sobre cacao que han sobrepasado los límites explicados por He et al. (2017) para

que la planta pueda mostrar signos de toxicidad, aun no se han reportado daños fisiológicos para este cultivo (Meter et al., 2019).

Argüello et al. (2019) en su estudio realizado en Ecuador, colectando muestras a nivel nacional, concluye que los principales factores para la absorción de cadmio en el cultivo de cacao se deben principalmente al cadmio total del suelo, pH y materia orgánica. Los estudios de Gramlich et al. (2016 y 2018) muestran el mismo comportamiento: donde el incremento del contenido de cadmio en el suelo conduce también a una mayor biodisponibilidad y mayor concentración de cadmio en los tejidos de cacao, así como, un incremento en la materia orgánica y el pH conduce a una menor biodisponibilidad y menor concentración de cadmio en la planta.

III. MATERIALES Y MÉTODOS:

3.1. Características del sitio experimental

3.1.1. Ubicación

El experimento se realizó en el campo de un agricultor asociado a la cooperativa “ACOPAGRO” ubicado en la localidad Collpa, distrito Huicungo, provincia Mariscal Cáceres, región San Martín, a una altitud de 335 m. s. n. m, cuyas coordenadas GPS son: latitud S 7° 20′ 2.72″ y longitud O 76° 46′ 9.95″.

3.1.2. Suelo

El suelo es de origen aluvial de relieve variable, de textura franco arenosa, pH moderadamente ácido, sin problemas de salinidad y un porcentaje de materia orgánica bajo, pero al relacionarlo con el contenido de arcilla, existe una acumulación inusual de materia orgánica en el bloque I (BI) por posibles problemas en el drenaje, que estaría provocando la acumulación de la materia orgánica y condiciones de reducción. Se tiene niveles bajos de fósforo y K disponibles (Tabla 2).

Con respecto a la concentración de cadmio en el suelo, se presenta un promedio de 0.95 ppm. No existe aún una clasificación para determinar en qué rango se encuentra este suelo, pero con respecto al estándar de calidad ambiental (ECA) para suelo, nos encontramos por debajo del rango permisible (<1.4 mg/kg PS).

Tabla 2: Características fisicoquímicas del suelo utilizado en el experimento.

Características	Unidad	Valor			Método
		BI	BII	BIII	
Clase textural		Fr. A.	Fr. A.	Fr. Ar. A.	
Arena	%	63	63	47	
Limo	%	26	22	26	
Arcilla	%	11	15	27	Hidrómetro
pH (1:1)		5.92	5.72	5.84	Potenciométrico
C.E (1:1)	dS/m	0.1	0.06	0.06	Conductímetro
M. O	%	2.15	0.37	1.72	Walkey y Black
CaCO ₃	%	0.00	0.00	0.00	Gasovolumétrico
P disponible	ppm	4.4	6.0	2.4	Olsen modificado
K disponible	ppm	41	56	108	Acetato de amonio
CIC	cmol.kg ⁻¹	16.96	15.68	22.72	Acetato de amonio pH.7.0
Cd	ppm	0.7	0.9	1.27	Absorción atómica
Zn	ppm	4.9	4.3	3.9	Absorción atómica
Fe	ppm	132.7	127.3	95.2	Absorción atómica

3.1.3. Condiciones climáticas

No se dispone debido a que no se contaba con estaciones meteorológicas cerca, por lo que no se cuenta con datos sobre las precipitaciones a lo largo del experimento, sin embargo, las lluvias comenzaron en el mes de setiembre registrándose las mayores intensidades a fines de octubre para luego descender un poco e incrementar con mayores intensidades para el mes de febrero, finalizando las lluvias en julio.

3.1.4. Cultivo

El campo de cacao utilizado para el estudio presenta el clon CCN 51 y con algunas accesiones criollas, con una edad de plantación de 15 años, donde no se observa abonamiento aplicado al suelo, solo existe manejo sanitario, principalmente para *Carmentia* sp. “el mazorquero” y manejo de malezas, considerando que se efectúa un manejo orgánico.

Se realizó un análisis previo, de contenido de cadmio en los componentes de la mazorca, los cuales se muestran en la tabla 3. Las mazorcas en evaluación fueron cosechadas en el mes de noviembre del 2017 (campaña chica), antes de comenzar la investigación.

Tabla 3: Contenido de cadmio (ppm) en los diferentes componentes de la mazorca de cacao.

Componente	Cadmio (ppm)		
	BI	BII	BIII
Almendra	0.87	3.73	2.05
Cascarilla más mucilago	0.41	0.23	0.15
Cáscara	0.37	1.18	0.75

Como se observa hay una alta variabilidad entre las plantas en los diferentes bloques en todos los componentes analizados.

3.2. Materiales

3.2.1. Implementos y equipos

Materiales de campo

- Rótulos de tratamientos
- Cintas de colores
- Jarra milimetrada 100mL
- Jeringa 40mL
- Baldes 4L y 24L
- Rastrillo
- Tijera de podar
- Sobres manila
- Fichas de evaluación
- Lapicero

Equipos e instrumentos

- Cámara digital
- Balanza
- Estufa

3.2.2. Productos comerciales empleados

a) Avibiol:

Avibiol es una enmienda orgánica líquida que contiene aminoácidos, metabolitos orgánicos, macro y micronutrientes biodisponibles de fácil absorción. Posee una carga microbiana importante de actinomycetes que varía de 6×10^2 a $1,48 \times 10^4$ u. f. c./mL, de bacterias totales (influyen sólo saprofitica y de interés como flora benéfica) que varía de $1,4 \times 10^2$ a $3,48 \times 10^4$ u. f. c./mL, lo cual, asociado a cierto nivel poblacional de hongos saprófitos (de 3,0 a $1,3 \times 10^2$ propágulos/mL) le confiere características de potencial antifitopatígeno en el suelo. La población bacteriana del Avibiol está compuesta en su totalidad por especies anaeróbicas facultativas y termorresistentes. Algunos metabolitos secretados por esta población microbiana son promotores del desarrollo de la planta, estimulando el metabolismo hormonal, el cual también es incentivado por el contenido de Zinc presente en el Avibiol promoviendo así un mayor desarrollo radicular y foliar.

Sus propiedades físico-químicas son:

- Aspecto físico: Líquido de color marrón oscuro de olor característico a guano.
- Densidad: 1,009 g/mL
- pH: 7.4-8.4
- CE (dS/m) en solución pura: 15-17

Y su composición está dada por:

Macro elementos

- Nitrógeno (N): <0,50% N
- Fosforo (P): <0,1% P_2O_5
- Potasio (K): <1% K_2O
- Calcio (Ca): <0,1% CaO
- Azufre (S): <0,1% SO_3
- Magnesio (Mg): <0,1% MgO

Micro elementos

- Hierro (Fe): <0,01% Fe
- Manganeseo (Mn): <0,02% Mn

- Zinc (Zn): <0,01% Zn
- Cobre (Cu): <0.001% Cu
- Boro (B): <0,01% B

Materia orgánica

- Materia orgánica total: 9.88%
- Ácidos húmicos: 0.41%
- Ácidos fúlvicos: <0.1%
- Extracto húmico total: 0.54%

Hormonas vegetales

- Ácido giberélico: 26.12 ppm.
- Citoquininas (Furfulamino Purina o Kinetina): 18.66 ppm
- Ácido indolacético: 21.50 ppm

b) Carbón Líquido Monty´s:

El carbón líquido Monty´s es un acondicionador de suelos líquido, con un alto nivel (100 veces más) de la sustancia húmica activada (HUMIGIN), la cual proporciona carbón y materia orgánica al suelo. No contiene NPK o algún micronutriente.

Ingredientes activos:

- Carbón orgánico: 2%
- Ácido húmico: 4%
- pH: 9.5-10.5

c) Avical:

Avical es una enmienda líquida de caliza en forma de suspensión concentrada floable; está formulada especialmente para neutralizar de manera rápida los suelos con pH ácido. El producto penetra en el suelo usando el agua como vehículo y llega a los sitios donde se encuentran las raíces provocando la reacción neutralizante. El ion Calcio (Ca^{+2}) que proviene de la disolución pasa a ocupar sitios de intercambio y sirve como nutriente. A su vez, otros nutrientes tienen mayor facilidad para desplazar excesos en las partículas del suelo y estar disponibles para el uso de la planta. En la aplicación se

realiza adicionalmente una acción física, biológica-desinfectante con la reacción exotérmica que se produce. Avical puede ejercer también una acción nutriente, desinfectante y cicatrizante al ser colocado en forma de aspersiones o pintado en las hojas o tallos de las plantas.

Sus propiedades físico-químicas son:

- Aspecto físico: Suspensión concentrada floable
- Estado físico: Líquido viscoso
- Color: Verde débil
- Olor: Característico de cal
- Densidad: 1,28 g/mL
- pH: 7.2 +- 0.1
- Solubilidad: Soluble en agua

Y su composición está dada por:

- Calcio (Ca): 30% CaO
- Componentes carbónicos líquidos: 70%

d) E-codargón:

Es un producto a base de materia orgánica líquida micro filtrada, favorece la estructura de suelo y aumenta la CIC; también aumenta la fijación de macro y micro elementos disponibles de manera natural. Aumenta la translocación y actividad nutricional.

Sus propiedades fisicoquímicas son:

- Aspecto físico: Solución oscura
- Estado físico: Líquido
- Color: Marrón
- Densidad: 1,17 +-0,05 g/mL
- pH: 5.0 +- 0.5
- Solubilidad: Soluble en agua

Y su composición está dada por:

- Calcio (Ca): 2,7% CaO
- Ácidos orgánicos: 35,7%

e) Codahumus 20:

Es un correctivo orgánico líquido con alto contenido de ácidos húmicos y fúlvicos, mejorador de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Sus propiedades fisicoquímicas son:

- Aspecto físico: Solución oscura
- Estado físico: Líquido
- Color: Negro
- Densidad: 1,13 +-0,05 g/mL
- pH: 12.8 +- 0.5
- Solubilidad: Soluble en agua

Y su composición está dada por:

- Ácidos húmicos: 11,3%
- Ácidos fúlvicos: 11,5%
- Potasio (K): 3,2% K₂O

3.2.3. Cadmio en los productos comerciales empleados

Los productos comerciales utilizados fueron sometidos al análisis de metales pesados en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4: Concentraciones de cadmio (ppm) en los productos utilizados en el experimento.

Producto	LD	Cd (mg/kg)	Método utilizado
Avibiol	0.02	<0.02	EPA METHOD 6020A
Avical	0.01	<0.01	EPA METHOD 6010C
Carbón Líquido Monty's	0.5	<0.5	EPA METHOD 6010
E-codargón	0.5	<0.5	No especifica
Codahumus 20	0.5	<0.5	No especifica

*LD: Límite de detección.

Se observa que todos los productos tienen un bajo contenido de cadmio por lo que no influenciarán con el aporte de este metal en el experimento.

3.3. Metodología

La investigación se realizó en condiciones de campo mediante la aplicación de cinco productos comerciales, de los cuales, tres productos fueron evaluados, con dos dosificaciones diferentes tal como se muestra en la tabla 5, siendo los dos productos restantes, constante en los tratamientos. Las dosificaciones descritas son totales por campaña y fueron aplicadas en dos momentos en partes iguales por aplicación.

Las dosificaciones trabajadas estuvieron basadas en experiencias del Grupo Avibiol en la mitigación del cadmio sobre los cultivos de palta y espárrago en condiciones de costa, siendo esta investigación, la primera experiencia en selva con dichos productos.

Tabla 5: Factores en estudio con sus respectivas dosificaciones.

Producto	Dosis	
	1 (L/ha)	2 (L/ha)
Avibiol	120	240
Carbón Líquido Monty's	8	16
Avical	0	20

Al combinar estas diferentes dosificaciones de las enmiendas: Avical, Avibiol y Carbón Líquido Monty's, acompañados de la adición de dosis estándar de las enmiendas E-codargón, y Codahumus 20, se obtienen ocho tratamientos, adicionalmente un testigo, para obtener así un total de nueve tratamientos (Tabla 6). Los cuáles se distribuyeron en tres bloques en el campo (Anexo 1). Cada tratamiento tuvo dos submuestras a evaluar por cada bloque, de las cuales se obtuvo un promedio.

Tabla 6: Descripción de los tratamientos con su respectiva dosificación

Número	Producto	Clave	Cantidad (L/ha)
1	Avical	CAL	0
	Avibiol	AVI	120
	Carbón Líquido	CAR	8
2	Avical	CAL	0
	Avibiol	AVI	120
	Carbón Líquido	CAR	16
3	Avical	CAL	0
	Avibiol	AVI	240
	Carbón Líquido	CAR	8
4	Avical	CAL	0
	Avibiol	AVI	240
	Carbón Líquido	CAR	16
5	Avical	CAL	20
	Avibiol	AVI	120
	Carbón Líquido	CAR	8
6	Avical	CAL	20
	Avibiol	AVI	120
	Carbón Líquido	CAR	16
7	Avical	CAL	20
	Avibiol	AVI	240
	Carbón Líquido	CAR	8
8	Avical	CAL	20
	Avibiol	AVI	240
	Carbón Líquido	CAR	16
9	TESTIGO		0

3.3.1. Variables a evaluar

Variables cuantitativas directas

a) Contenido de cadmio:

- En mazorca: En pleno desarrollo de la mazorca (BBCH 77) (Bridgemohan et al., 2016), cuando la mazorca a alcanzado, en promedio, el 70% de su tamaño final.
- En los componentes de una mazorca: Al final de la campaña (BBCH 89) (Bridgemohan et al., 2016), en una mazorca madura, analizando los tres componentes por separado (cáscara, cascarilla y almendra).

- b) Contenido de nutrientes
 - En almendra: Al final de la campaña.
- c) Componentes de productividad
 - Número de mazorcas: Conteo cada mes hasta el comienzo de cosecha.
 - Peso de almendras: Promedio de una determinada cantidad de almendras.
 - Cosecha acumulada: Considerando la cosecha desde abril hasta junio del 2018

Variables cuantitativas derivadas

- Peso seco de raicillas: Al final de la cosecha.

3.3.2. Procedimientos

a) Instalación del experimento

- Señalización del experimento

Primero se señalaron las 12 plantas que conforman una unidad experimental con una cinta de un color correspondiente a cada tratamiento. Las dos plantas del centro (unidades observacionales) se identificaron con unos rótulos con la descripción del número de planta, tratamiento y bloque respectivo.

- Aplicación de los productos

Se realizó dos aplicaciones de los productos en la campaña, la primera aplicación se realizó a comienzos de floración y la segunda aplicación luego de tres meses, en pleno desarrollo de la mazorca (BBCH 77).

Para la aplicación de los productos se retiraron los rastrojos al pie de planta hasta la proyección de la copa, con la finalidad de facilitar el contacto directo del producto con el suelo. Luego se realizó la aplicación de los productos por tratamiento, teniendo en cuenta el adecuado nivel de humedad del suelo. Finalmente se devolvió el rastrojo que se había removido para la aplicación.

Todos los productos se dosificaron en un balde de 24 litros, la solución del balde, una vez removida por cinco minutos, se repartió en seis baldes de 4 litros para la aplicación a las plantas en “drench” en la proyección de la copa. Cada planta fue aplicada con un balde de 4 litros, por tanto, por tratamiento se realizó la dosificación en dos baldes grandes de 24 litros.

- Manejo agronómico

Se realizó un manejo de malezas mensual a las plantas en estudio, deschuponado en caso se observe y un manejo sanitario principalmente contra el mazorquero (*Carmenta spp.*)

b) Metodología de evaluación

- Cultivo

Los análisis fueron efectuados en el laboratorio de fertilidad de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Para la determinación del análisis de cadmio: Se extrajo una mazorca por planta evaluada, ubicada en el tercio medio.

Se evaluaron el contenido de cadmio:

- En una mazorca en pleno desarrollo (BBCH 77).
- En los componentes de la mazorca (cáscara, cascarilla y almendra), en la tercera cosecha, donde se observó la mayor cantidad de mazorcas cosechadas.
- Adicionalmente a estas dos evaluaciones, se realizaron evaluaciones complementarias, a las almendras en el mes de mayo y a los granos secados y fermentados (almendras más cascarilla) en el mes de junio. Estas evaluaciones complementarias fueron realizadas a solo un grupo de tratamientos.

Para la determinación de productividad: Se evaluaron tres componentes de productividad. Mensualmente se contabilizaron el número de mazorcas por planta, contabilizando también el número de mazorcas muertas. Se evaluó el peso de 30 almendras para realizar el comparativo de ganancia de peso seco por tratamiento y finalmente se contabilizó la cosecha acumulada en peso seco en cuatro ocasiones durante los meses de abril y junio.

Para la determinación de desarrollo radicular: Se extrajo una porción de suelo, con la ayuda de un cilindro de metal de 22 cm de diámetro y 25 cm de profundidad, a 1.4 m del pie del tronco, justo en el área de proyección de la copa del árbol. Luego la porción de suelo extraída, se procedió a lavar con cuidado las raíces de cacao para la determinación del peso seco. El volumen total del suelo extraído mediante el cilindro

es $0.0095 m^3$ y es utilizado como factor de conversión para tener los datos por metro cubico de suelo (Anexo 2).

- Análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio realizados en la investigación se desarrollarán de acuerdo a las metodologías utilizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF).

3.4. Diseño estadístico

El diseño estadístico utilizado en este experimento fue un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), teniendo en total nueve tratamientos y tres bloques.

El modelo aditivo lineal es el siguiente:

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

Donde:

Y_{ij} : Valor observado en el i-ésimo tratamiento y j-ésimo bloque.

μ : Efecto de la media general.

τ_i : Efecto del i-ésimo tratamiento.

β_j : Efecto del j-ésimo bloque.

ε_{ij} : Efecto del error experimental en el i-ésimo tratamiento y el j-ésimo bloque.

Los resultados obtenidos en las evaluaciones de las variables evaluadas fueron sometidas a un análisis de varianza (ANVA) para observar el comportamiento del error experimental, en base a ello se realizaron las pruebas de comparación múltiple mediante la prueba estadística de Duncan al 0.05% para observar las diferencias estadísticas que se puedan presentar entre los tratamientos aplicados. Los datos de la investigación fueron analizados con el programa estadístico R, versión 3. 5. 1. Empleando el paquete Agricolae (R Core Team, 2016).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El trabajo se desarrolló en el campo de un productor de cacao, el mismo que presentaba una alta variabilidad en su relieve, así como en el tipo de planta (CCN51 y criollos).

Los resultados fueron analizados en base a:

- Desarrollo radicular
- Análisis de productividad
- Concentración de cadmio en los componentes de la mazorca de cacao

4.1. Análisis de desarrollo radicular

El desarrollo radicular evaluado en el mes de junio, finalizando la cosecha, se incrementó con la implementación de los tratamientos (Figura 1).

El mayor desarrollo de raíces activas se obtuvo con la mayor dosificación de todos los productos, es decir el tratamiento 8 presentó 215.8 g. m^{-3} de materia seca por planta siendo estadísticamente superiores al testigo con 120.0 g. m^{-3} de materia seca (Tabla 7). El desarrollo de raicillas totales, en general, también se incrementó con la aplicación de los productos, sin embargo, este incremento no fue significativo.

Al analizar las medias, agrupando los tratamientos con diferentes dosificaciones de los productos, se observó que se tiene una respuesta favorable en el desarrollo de raicillas con la aplicación de los productos, destacando los tratamientos en los cuales se les aplicó Avical (20 L/Ha) (Anexo 3a). También se observó que a mayor dosificación de Avibiól, mayor era el desarrollo de raicillas (Anexo 3b). Para las dosificaciones de carbón líquido, el mayor desarrollo de raicillas se observó con la menor dosificación, con la mayor dosificación también se incrementó el peso seco de raicillas a diferencia del testigo, pero esta ganancia fue menor que el incremento que se observó con la menor dosificación (Anexo 3c).

Tabla 7: Peso seco ($g \cdot m^{-3}$) de raicillas de cacao al final de la cosecha.

Tratamiento	Dosis			Peso seco (g)			
	CA L	AV I	CAR	Raicillas activas		Raicillas totales	
Test	0	0	0	120.0	b	372.6	a
T1	0	120	8	155.8	a b	487.4	a
T2	0	120	16	196.8	a b	414.7	a
T3	0	240	8	156.8	a b	384.2	a
T4	0	240	16	138.9	a b	457.9	a
T5	20	120	8	172.6	a b	524.2	a
T6	20	120	16	170.5	a b	392.6	a
T7	20	240	8	192.6	a b	474.7	a
T8	20	240	16	215.8	a	470.5	a
C. V.				44.36%		29.39%	

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibiol (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

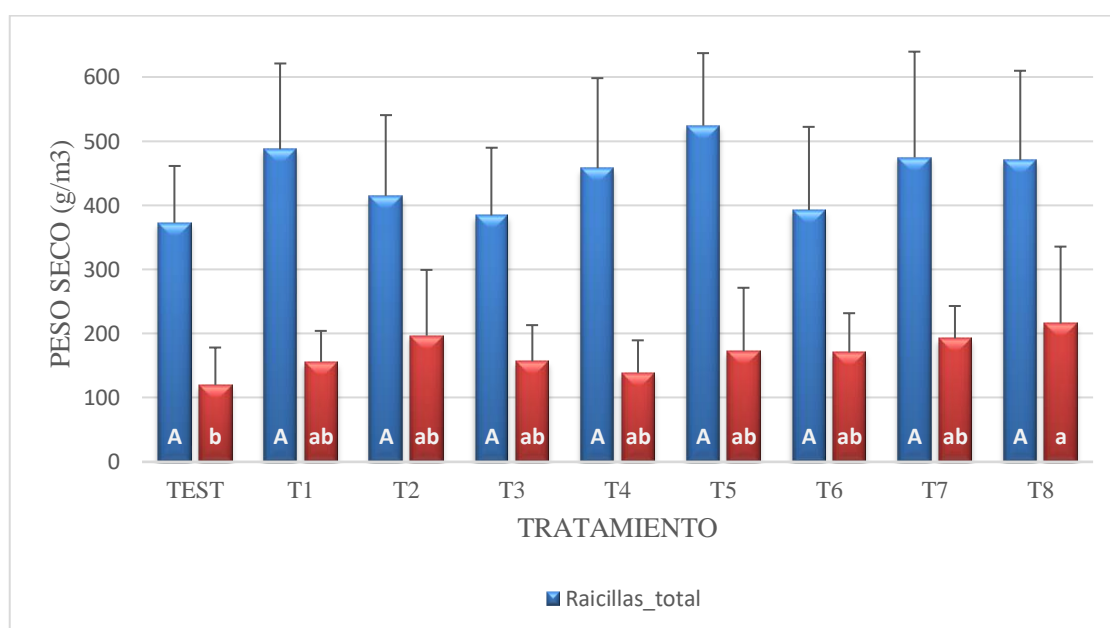


Figura 2: Peso seco de raicillas ($g \cdot m^{-3}$) de cacao al final de la cosecha.

Se observa que los tratamientos en los cuales se les aplicó Avical junto con la mayor dosificación de Avibiol, se incrementó el desarrollo radicular. El producto Avibiol presenta fitoquímicos relacionados con el enraizamiento, el cual es incentivado por el calcio disponible, aportado por el producto Avical, que mejora el proceso de desarrollo radicular al tener una triple función: en la multiplicación celular, en el crecimiento celular y la

neutralización de hidrogeniones estabilizando las membranas recientemente sintetizadas (Navarro & Navarro, 2003).

4.2. Análisis de productividad

El efecto de los productos aplicados sobre la productividad del cacao se efectuó en base a tres componentes del rendimiento: el número de mazorcas por planta, el peso seco de las almendras y la cosecha acumulada total.

4.2.1. Efecto de los tratamientos sobre el número de mazorcas

El número total de mazorcas por planta, durante la campaña evaluada desde abril hasta junio, no se incrementó de manera significativa con la aplicación de los productos en los diferentes tratamientos. Se observó que el número total de mazorcas tuvo su pico máximo entre los meses de febrero y marzo, meses en donde las mazorcas estaban en pleno desarrollo y donde se tuvo también una gran cantidad de mazorcas muertas (Anexo 4). Con respecto a las mazorcas sanas, tampoco se obtuvieron diferencias estadísticas significativas para los cuatro meses de evaluación. Los resultados del número de mazorcas sanas (Tabla 8), nos muestran un incremento en los tres primeros meses de evaluación en los tratamientos con la aplicación de los productos y en mayor medida en los cuatro últimos tratamientos, en los cuales se aplicaron todos los productos. Se puede observar también que existe una alta variabilidad en la evaluación de este parámetro, siendo mayor la variabilidad en el mes de mayo (56.78 por ciento) debido a la cosecha que ya se estaba teniendo en el campo, la cual comenzó en el mes de abril.

Al analizar las medias, agrupando los tratamientos con diferentes dosificaciones de los productos, se observó que se tiene una respuesta favorable en el número de mazorcas sanas en los tratamientos en los cuales se aplicó Avical (20 L/ha) (Anexo 5a), de igual manera se observó que a mayor dosificación de Avibiol (Anexo 5b), mayor es el número de mazorcas por planta. Para las dosificaciones de carbón líquido, también se observa un incremento del número de mazorcas en comparación con el testigo (Anexo 5c), pero menor en comparación con el incremento que se obtuvo en los tratamientos donde se les aplicó Avical y al aumentar la dosificación de Avibiol.

Tabla 8: Número de mazorcas sanas entre los meses de febrero y mayo.

Tratamiento	Dosis			Número de mazorcas			
	CAL	AVI	CAR	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Test	0	0	0	27.0	22.5	18.0	13.3
T1	0	120	8	26.2	24.5	18.2	13.0
T2	0	120	16	34.5	28.5	22.5	16.5
T3	0	240	8	28.0	27.8	22.3	14.5
T4	0	240	16	34.2	30.0	17.7	11.3
T5	20	120	8	36.8	28.0	26.3	18.2
T6	20	120	16	29.0	27.5	19.5	9.7
T7	20	240	8	33.2	34.0	20.8	12.7
T8	20	240	16	36.2	31.7	23.2	10.7
C. V.				35.65%	38.19%	38.81%	56.78%
Tratamiento				NS	NS	NS	NS

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibiol (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

Los tratamientos que recibieron Avical tuvieron una respuesta favorable en el incremento del número de mazorcas, la cual fue complementado con el producto Avibiol y carbón líquido. Aparentemente el parámetro analizado responde bien a la dosificación de calcio, elemento que se mueve por flujo de masas en el suelo, por lo que su presencia por lo general es baja y las plantas sufren con problemas de deficiencia de este elemento.

4.2.2. Efecto de los tratamientos sobre el peso seco de almendras

Se observa que el peso seco de 30 almendras en los tratamientos T7 y T8 fueron estadísticamente superiores al testigo (Anexo 6, Figura 2, Tabla 9).

De igual manera los tratamientos con Avical fueron superiores al testigo, en el peso seco de 30 almendras, al igual que cuando se aplicó Avibiol, pero las diferencias fueron menores cuando se incrementó la dosis de carbón activado (Anexo 7).

Tabla 9: Peso seco de 30 almendras cosechadas de los diferentes tratamientos aplicados.

Tratamiento	Dosis			Peso seco de almendras (g)	Significancia	
	CAL	AVI	CAR			
Test	0	0	0	37.48		c
T1	0	120	8	40.96		b c
T2	0	120	16	41.95	a	b c
T3	0	240	8	39.77		b c
T4	0	240	16	40.17		b c
T5	20	120	8	40.49		b c
T6	20	120	16	40.35		b c
T7	20	240	8	46.50	a	b
T8	20	240	16	48.36	a	

C. V. 12.65%

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibiol (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

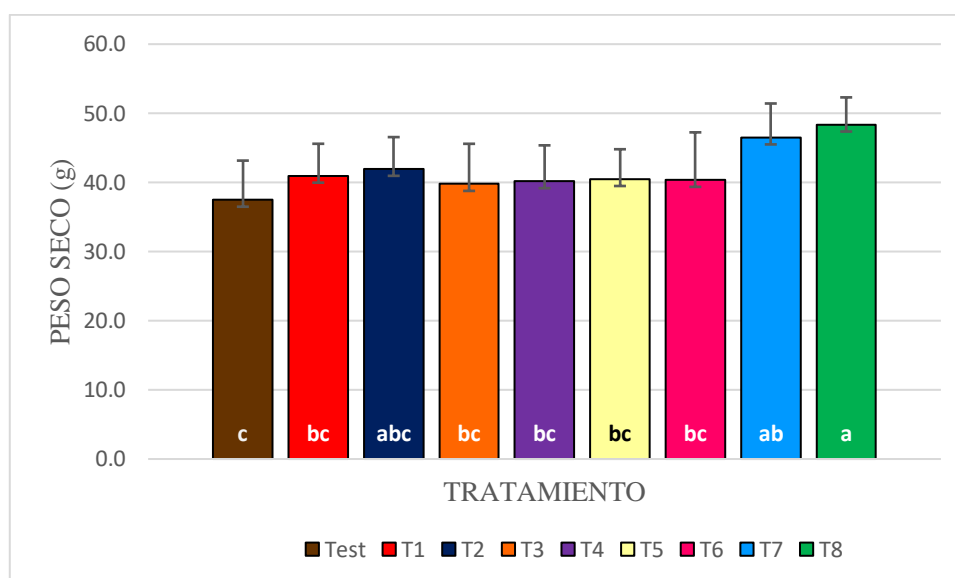


Figura 3: Peso seco de 30 almendras cosechadas en los diferentes tratamientos aplicados.

Si bien la aplicación de los productos no aumentó de manera significativa el número de mazorcas, se observa que, si se tiene un efecto positivo en el aumento del peso seco de 30 almendras donde se presentó un mayor desarrollo de la planta, debido a una mayor presencia de raicillas producto de la aplicación de Avibiol y el calcio aportado por el producto Avical, el cual se ve complementado con la aplicación de carbón líquido. El acondicionamiento del suelo que se dio al aplicar los productos generó un efecto positivo en la absorción de nutrientes y con ello un mayor peso seco en almendras. En el tratamiento 2 se observa que,

a pesar de tener una baja dosificación de los productos, se obtuvo un buen peso seco de almendras cosechadas, esto explicado por la gran cantidad de raíces activas (tabla 7 y 9) que se tenía en este tratamiento.

4.2.3. Efecto de los tratamientos sobre la cosecha acumulada

Los tratamientos que recibieron la totalidad de los productos biodegradables presentaron una mayor cosecha acumulada que fue estadísticamente superior a la obtenida por el testigo (Figura 3, Tabla 10)

Considerando las medias con diferentes dosificaciones de los productos, los tratamientos con Avical presentaron una tendencia a una mayor producción, al igual que al incrementar la dosificación de Avibioli, mientras que el incremento de dosificación del carbón activado no generó una mayor respuesta en producción, la diferencia entre ambas dosificaciones para el carbón activado es mínima en comparación a las diferencias mostradas en las diferentes dosificaciones de Avical y Avibioli (Anexo 6).

Tabla 10: Cosecha acumulada desde abril hasta junio en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Dosis			Cosecha acumulada (kg/ha)	Significancia
	CAL	AVI	CAR		
Test	0	0	0	814.73	b
T1	0	120	8	810.62	b
T2	0	120	16	834.40	a b
T3	0	240	8	829.97	a b
T4	0	240	16	820.48	a b
T5	20	120	8	875.29	a b
T6	20	120	16	831.57	a b
T7	20	240	8	946.12	a b
T8	20	240	16	1112.83	a

C. V. 28.75%

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibioli (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

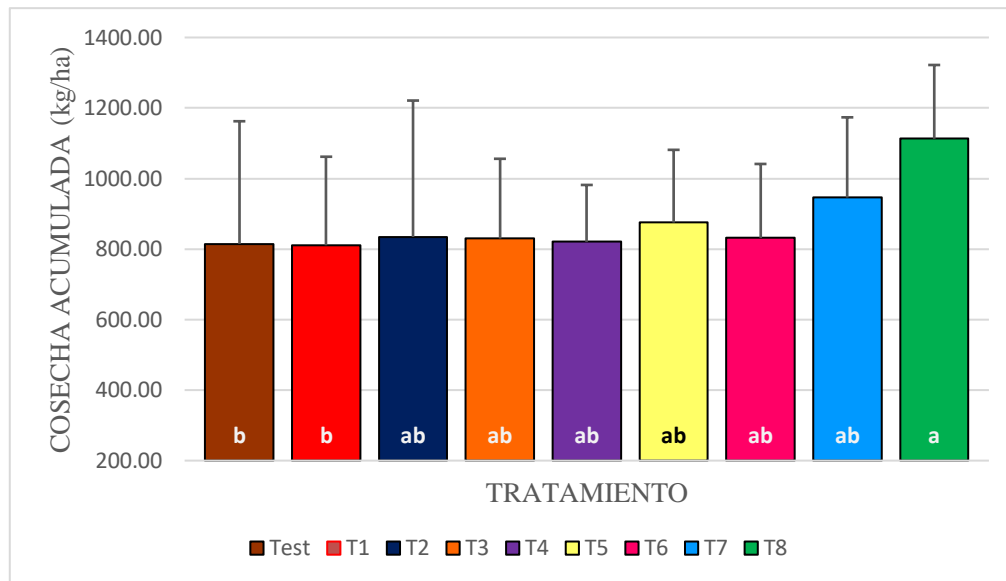


Figura 4: Peso seco de la cosecha acumulada en los diferentes tratamientos aplicados.

El aumento peso seco de granos cosechados está relacionado más a la ganancia de peso que se tuvo en las almendras, que al incremento del número de mazorcas por planta en los tratamientos. Al tener unas mejores condiciones en el suelo, mejorando el desarrollo radicular, se logra un óptimo desarrollo de las mazorcas presentes y consigo un mejor llenado de granos lo que conlleva a un mayor peso en cosecha, esto se puede observar en el análisis de regresión realizado (Figura 6) donde se observa una correlación positiva entre el peso seco total de raicillas y la cosecha acumulada.

4.3. Análisis de extracción de cadmio

El efecto de los tratamientos sobre la acumulación de cadmio fue analizado en base a la concentración de cadmio en la mazorca para el mes de marzo y en los componentes de la mazorca (cáscara, cascarilla y almendra) para el mes de junio.

4.3.1. Efecto de los tratamientos en la acumulación de cadmio en el mes de marzo

El análisis de concentración de cadmio en el mes de marzo se realizó cuando se llegó al pico de producción de mazorcas totales por planta (anexo 4), para observar la concentración de cadmio que se había acumulado en la mazorca, la cual estaba en pleno crecimiento.

Al realizar el análisis de varianza (anexo 8), no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (tabla 11) y tampoco existieron diferencias entre los bloques. La mayor concentración de cadmio se observó en el testigo con 0.24 ppm a diferencia de los demás tratamientos con las diferentes dosificaciones de los productos. Existe una baja concentración de cadmio para todos los tratamientos y una alta variabilidad (95.15 por ciento) en la concentración de este elemento en una mazorca en pleno desarrollo.

Al analizar las medias, agrupando los tratamientos con diferentes dosificaciones de los productos, se observa una disminución promedio de 0.1 ppm para todas las combinaciones de los productos, a diferencia del testigo (Anexo 9 a, b y c). Es decir, que, al aumentar las dosificaciones de todos los productos, no se disminuyó más la concentración de cadmio en la mazorca.

Tabla 11: Contenido de cadmio (ppm) en las mazorcas en pleno desarrollo evaluadas en el mes de marzo.

Tratamiento	Dosis			Contenido de cadmio (ppm) en la mazorca
	CAL	AVI	CAR	
Test	0	0	0	0.24
T1	0	120	8	0.19
T2	0	120	16	0.22
T3	0	240	8	0.10
T4	0	240	16	0.10
T5	20	120	8	0.18
T6	20	120	16	0.10
T7	20	240	8	0.14
T8	20	240	16	0.15
C. V. 95.15%				
Tratamiento				NS

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibiol (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

4.3.2. Efecto de los tratamientos sobre la acumulación de cadmio en el mes de junio

El análisis de contenido de cadmio para el mes de junio se realizó casi al final de la campaña en donde se obtuvo la mayor cantidad de mazorcas cosechadas (anexo 10). Se evaluó la concentración de cadmio en los tres componentes de la mazorca: la cáscara, la cascarilla recubierta por el mucílago y la almendra. Los análisis de varianza para los tres componentes de la mazorca se muestran en el anexo 11, en donde se observa que no existe diferencia

estadística entre los tratamientos para los tres componentes, sin embargo, existe diferencia altamente significativa para la concentración de cadmio entre bloques.

En la cáscara, los tratamientos con las mayores dosificaciones de los productos (tratamiento 7 y 8) registraron las menores concentraciones de cadmio, siendo el testigo, el tratamiento con la mayor concentración de cadmio (Tabla 12, Figura 4).

En la cascarilla, al realizar la prueba estadística (Duncan 0.05) para hacer las comparaciones múltiples, se tuvo la menor concentración de cadmio en el tratamiento 1, siendo estadísticamente diferente a los tratamientos 2 y 4, donde se registraron las mayores concentraciones de cadmio (Tabla 12, Figura 4).

En la almendra, los tratamientos 2, 3 y 8 registraron las menores concentraciones, siendo el testigo y el tratamiento 6, los tratamientos con la mayor concentración de cadmio (Tabla 2, Figura 4).

Considerando las medias, se observa que la mayor disminución de concentración de cadmio se obtuvo en la cáscara. Se presentó una tendencia a una menor concentración de cadmio a medida que se incrementaba la dosificación de cada producto, teniendo mayor efecto el producto Avibiol (Anexo 13). Las concentraciones de cadmio en cascarilla con mucílago obtenidas fueron similares para todas las dosificaciones de los tres productos, en donde no se observó ninguna diferencia de medias con respecto al testigo (Anexo13). El mismo comportamiento se observó para las concentraciones de cadmio en almendra, en donde se tiene una tendencia a una menor concentración de cadmio con la aplicación de los productos, teniendo mejores respuestas con la mayor dosificación de Avibiol y la menor dosificación de carbón líquido (Anexo 13).

Tabla 12: Contenido de cadmio (ppm) en los tres componentes de la mazorca evaluados en el mes de junio.

Tratamiento	Dosis			Contenido de cadmio (ppm)			
	CAL	AVI	CAR	Cáscara	Cascarilla con mucílago	Almendra	
Test	0	0	0	1.161	0.273	a b	0.810
T1	0	120	8	0.878	0.136	b	0.768
T2	0	120	16	0.976	0.362	a	0.490
T3	0	240	8	0.768	0.318	a b	0.531
T4	0	240	16	0.890	0.337	a	0.793
T5	20	120	8	0.853	0.320	a b	0.621
T6	20	120	16	1.020	0.322	a b	0.942
T7	20	240	8	0.753	0.250	a b	0.671
T8	20	240	16	0.672	0.316	a b	0.615
C. V.				39.62%	34.96%		37.98%
Tratamiento				NS	*		NS
Bloque				**	**		**

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibiol (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

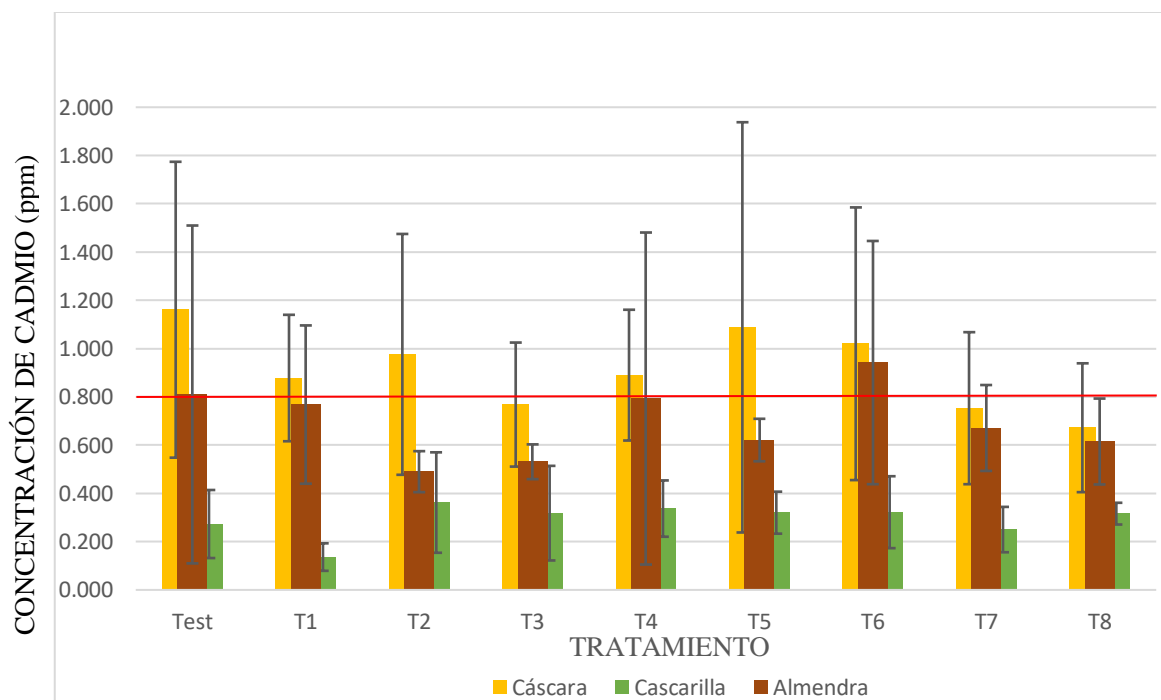


Figura 5: Concentración de cadmio en los tres componentes de la mazorca para el mes de junio.

Se puede observar que, a diferencia de la concentración de cadmio en marzo, se tiene una mayor concentración de cadmio en los tres componentes de la mazorca, siendo mayor en cáscara y almendra. De acuerdo con Brigemohan (2016), el crecimiento de la mazorca está

comprendida por una fase de desarrollo de la mazorca, compuesta por seis etapas, y otra fase de maduración, compuesta por tres etapas. La evaluación en el mes de marzo fue realizada a mazorcas las cuales estaban en la quinta etapa de la fase de crecimiento (BBCH 77), quedando una última etapa de desarrollo para iniciar la fase de maduración de la mazorca. Es en esta última etapa de desarrollo y en la fase de maduración en donde se tiene la mayor absorción de cadmio en los componentes de la mazorca ya que la concentración observada en el experimento, en una mazorca madura cosechada, llega a ser hasta cuatro veces mayor de la concentración que se tenía en una mazorca en pleno crecimiento en el mes de marzo (Tablas 11 y 12).

El cadmio es uno de los metales traza más solubles, peligroso debido a su alta movilidad (Miranda et al., 2008), esto se evidencia en el experimento ya que se observa un comportamiento inusual en los tratamientos para los tres componentes de la mazorca. Argüello et al. (2019) en sus resultados obtenidos en Ecuador muestran variaciones en el contenido de cadmio en el cacao y en suelo, en múltiples niveles tales como provincias, cantones e incluso campos de agricultores, lo que implica un alto nivel de heterogeneidad. En el anexo 15 se muestra la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio, por cada tratamiento y bloque a lo largo de todo el campo experimental, donde se observa un grupo de tratamientos cercanos con alta concentración de cadmio. Comparándolo con los resultados, de las evaluaciones complementarias realizadas en mayo, de concentración de cadmio en almendra (Anexo 14), se observa que el foco de alta concentración de cadmio no es similar en ambas evaluaciones. Para el mes de mayo las mayores concentraciones de cadmio en almendra estuvieron localizadas en un grupo de tratamientos del bloque II y para las evaluaciones del mes de junio, las mayores concentraciones de cadmio estuvieron localizadas en un grupo de tratamientos del bloque I. Para el bloque III no se observó un comportamiento anómalo con respecto a mayores concentraciones por focos. Debido a la alta movilidad que tiene el elemento y la gran concentración de cadmio que se acumula en las últimas etapas del crecimiento de la mazorca, no se puede observar con mayor seguridad el efecto real de los productos. Existen numerosas investigaciones que respaldan lo observado, se presenta una gran variabilidad entre los puntos evaluados, con ciertas áreas con altas concentraciones a manera de focos, llamadas “puntos calientes”, mostrando valores muchos más altos que el resto (Gramlich et al., 2018; Bravo et al., 2018; Barraza et al., 2017; Argüello et al., 2019; Arévalo et al., 2017; Tantalean Pedraza et al., 2017; Mite et al., 2010), sin embargo, estos estudios no detallan si los “sitios calientes” varían en posición en

diferentes momentos de evaluación a lo largo de la campaña, lo que sí se pudo observar en esta investigación, aun siendo evaluaciones con un mes de diferencia, estas áreas con altas concentraciones varió en posición.

4.3.3. Evaluaciones complementarias de la concentración de cadmio en almendra

En la tabla 13 se observan las evaluaciones complementarias que se realizó para comprender mejor el efecto de los productos sobre la acumulación de cadmio. Se observa que al igual que las evaluaciones en marzo y en junio, en el mes de mayo, también existe un efecto positivo en la disminución de la concentración de cadmio, con la aplicación de todos los productos y en especial con las mayores dosificaciones (tratamiento 7 y 8). Para el tratamiento 4 se observar mayor concentración de cadmio que el testigo, esto se debe a que para dicho mes se observó un grupo de tratamientos donde se focalizaba las altas concentraciones de cadmio en el bloque II (Anexo 14).

También se puede observar para la evaluación de junio, en los granos fermentados y secados, que hay una mayor concentración de cadmio a diferencia de evaluar las almendras sacadas de la mazorca sin haberlas fermentado.

Tabla 13: Evaluaciones complementarias de concentración de cadmio en almendra para el mes de mayo y concentración de cadmio en grano (cascarilla con almendra) para el mes de junio.

Tratamiento	Dosis			Concentración de cadmio (ppm)	
	CAL	AVI	CAR	Almendra (mayo)	Grano (junio)
Test	0	0	0	0.71	1.66
T3	0	240	8	0.75	1.12
T4	0	240	16	0.95	1.12
T7	20	240	8	0.53	0.78
T8	20	240	16	0.38	0.82
C. V.				49.04%	69.55%
Tratamiento				NS	NS

Dosis: **CAL:** Avical (L/ha), **AVI:** Avibiol (L/ha), **CAR:** Carbón líquido Monty's (L/ha). Todos los tratamientos con dosificación estándar de E-codargón (20L/ha) y Codahumus 20 (8L/ha) a excepción del testigo.

Cuenca (2012) en una investigación en maíz, observó que la aplicación de calcio al suelo, reduce la absorción de cadmio, por otro lado, Balta (2019) en su investigación acerca del efecto del carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio en tomate, observa la eficiencia del carbón activado en la reducción de la absorción de cadmio, debido a la mayor área y carga superficial que presenta. El efecto favorable de la adición de la materia orgánica especializada, sumada al calcio, los microorganismos, micronutrientes y hormonas promotoras del desarrollo radicular, todo ello complementado con el carbón activado que confiere una alta capacidad de retención, favorecen la disminución de la concentración de cadmio en almendra.

4.4. Análisis de correlación entre las variables evaluadas

4.4.1. Relación entre la concentración de cadmio y la concentración de calcio

Para las evaluaciones complementarias de mayo se realizó un análisis de correlación entre la concentración de cadmio y la concentración de calcio presentes en las almendras de cacao (anexo 17), donde se encontró una correlación negativa entre estas variables ($r=-0.48$) (Figura 5). Considerando la relación que existe entre la concentración de calcio y de cadmio en la almendra, se puede apreciar que la variable concentración de calcio influye en un 23 por ciento en la concentración de cadmio presente en la almendra.

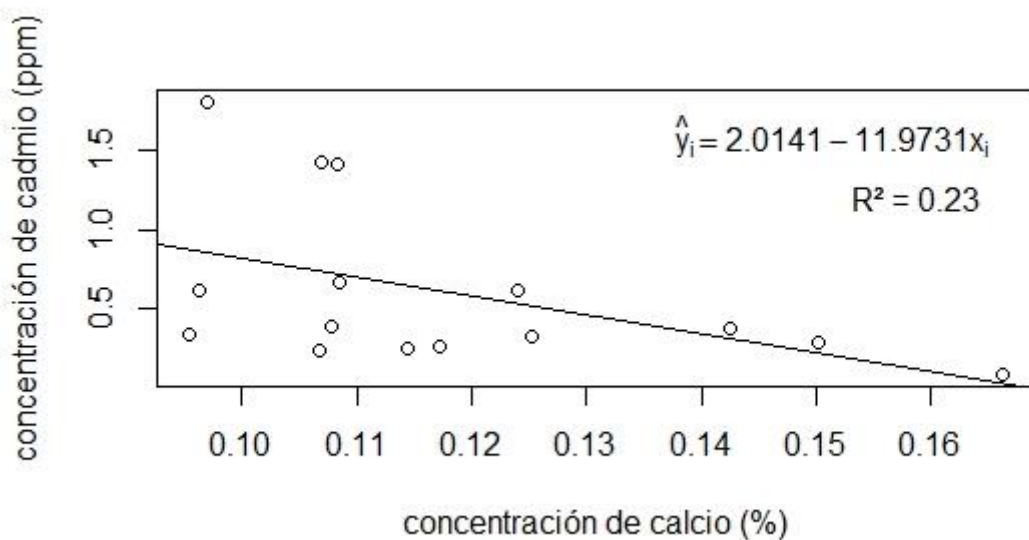


Figura 6: Relación entre la concentración de cadmio y la concentración de calcio presentes en la almendra cosechada en el mes de mayo.

Se puede observar que a mayor concentración de calcio se tiene una menor concentración de cadmio en almendra, explicada por la competencia de ambos elementos en su ingreso a la planta (Suzuki, 2005), ya que el cadmio ingresa a la planta a través de los canales de calcio por imitación (Perfus-Barbeoch et al., 2002). Sin embargo, la correlación no es tan fuerte ya que la mayor concentración de calcio absorbido por la planta se esperaría tener en las hojas, además que existe un gran número de proteínas transportadoras involucradas en el transporte de cadmio (Maser et al., 2001).

Por otro lado, el análisis de correlación que se realizó en junio, se muestra una correlación no significativa (anexo 25) entre ambos elementos. Navarro y Navarro (2003) explica que, en suelos ácidos, de alta pluviometría, el movimiento del calcio es más amplio, el agua disuelve a las bases solubles que se pierden en gran proporción, además parte de este elemento es absorbido por las plantas. Esta correlación no significativa, para la cosecha del mes de junio, muestra que la concentración de calcio en el suelo, se ha ido disminuyendo y con ello la competencia entre estos elementos (Tabla 14).

Tabla 14: Coeficiente de correlación de la concentración de cadmio y la concentración de calcio en los meses de mayo y junio.

		Cd (ppm) en almendras de cacao	
		Mayo	Junio
Ca (%) en almendras de cacao	Mayo	-0.48	
	Junio		0.01

4.4.2. Relación entre el desarrollo radicular con la cosecha y la concentración de cadmio.

Se ha encontrado una correlación positiva entre el peso seco de raicillas y la cosecha acumulada de cacao ($r=0.35$). Considerando la relación que existe entre el peso de raicillas y la cosecha acumulada, se puede apreciar que la variable peso seco de raicillas totales influye en un doce por ciento en la cantidad de cosecha acumulada (Anexo 18, Figura 6).

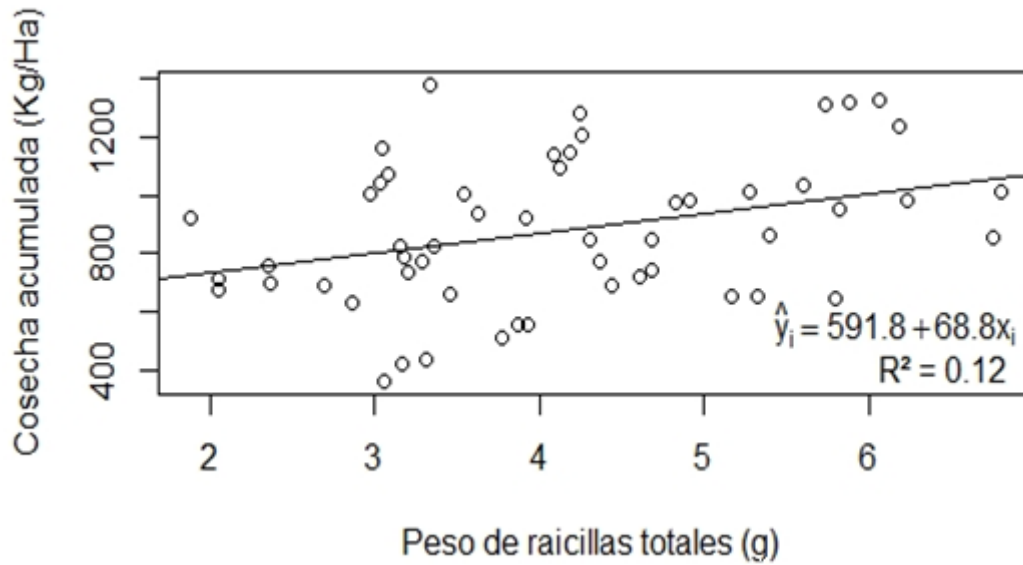


Figura 7: Relación entre la concentración del peso seco de la cosecha acumulada y el peso seco de raicillas totales.

La mayor producción también está relacionada también con otros aspectos como, la cantidad de nutrientes en el suelo, el material genético, grado de sombreado, así como otros factores asociados a la edad de la planta, control sanitario y al suelo (Ramos et al., 2000). En el campo se observó que el grupo de plantas del bloque III presentaban mayor sombra con respecto a los demás bloques, que limitaban la producción del cacao, por otro lado, las condiciones de sombra de dicho bloque, se presentaban óptimas para una mejor humedad del suelo y un mayor desarrollo radicular.

La relación entre la concentración de cadmio y el desarrollo de raicillas totales en el cacao se observa que existe una correlación negativa entre estas variables ($r=-0.46$) (anexo 21) (Tabla 15). Considerando la relación que existe entre el peso seco de raicillas totales y la concentración de cadmio en la almendra, se puede apreciar que la variable peso seco de raicillas totales influye en un 21 por ciento en la concentración de cadmio presente en la almendra.

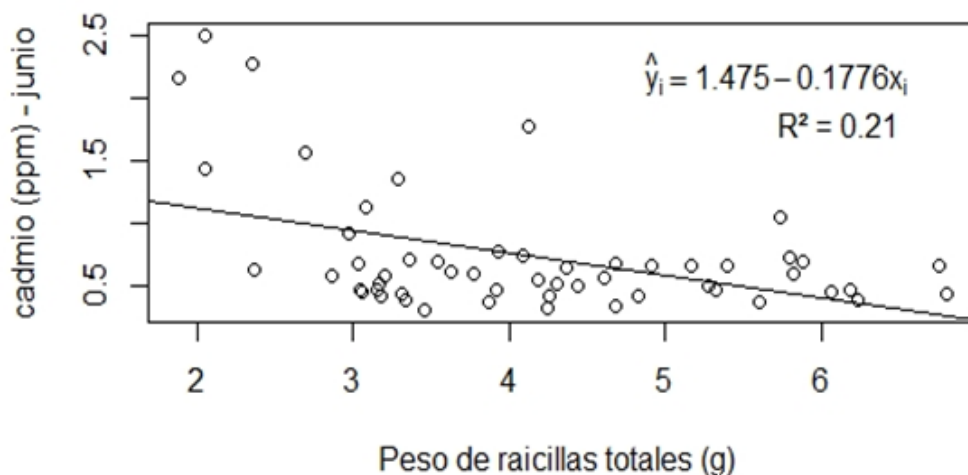


Figura 8: Relación entre la concentración de cadmio en almendra y el peso seco de raicillas totales.

En la figura 7 se observa que existe una tendencia a la disminución de la absorción de cadmio, expresada en la concentración de cadmio presente en la almendra, con el incremento del desarrollo de raicillas. Al aumentar el desarrollo de raicillas se incrementa consigo una mayor superficie radicular que puede absorber a los nutrientes que tienen poca movilidad en el suelo (Mengel y Kirby, 2001) dándole a la planta mayor oferta de elementos esenciales y consiguiendo disminuyendo el ingreso del cadmio.

Tabla 15: Coeficiente de correlación del peso de raicillas, peso seco de cosecha para el mes de dicha evaluación con la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

	Cd (ppm) en almendras de cacao-junio
Raicillas totales (g)	-0.46
Peso seco de cosecha (kg/ha) -junio	-0.17

Por otro lado, realizando el análisis de la relación que existe entre la concentración de cadmio en almendra y el peso seco cosechado en dicha evaluación se obtiene una baja correlación (anexo 23) con coeficiente de determinación de 0.03, lo que explica que el 0.03 por ciento del valor de la concentración de cadmio es explicada por el peso seco cosecha para dicha evaluación, es decir que la cantidad de mazorcas cosechables presentes en la planta no determina en gran medida la concentración de cadmio en las almendras de cacao.

V. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en las cuales se efectuó el trabajo de investigación concluimos:

1. Existe un incremento de raicillas con la aplicación de las mayores dosis de todos los productos utilizados en esta tesis.
2. La mayor influencia de los productos en el rendimiento se observó en el aumento de peso seco de los granos para los dos tratamientos con las mayores dosificaciones de los productos (tratamientos 7 y 8), siendo estos tratamientos estadísticamente mejores, y esto reflejado en la mayor productividad en la cosecha acumulada.
3. Existe una alta variabilidad para la concentración de cadmio en la mazorca y sus componentes, y una alta movilidad del cadmio en el suelo a través del tiempo, que dificultan observar el efecto real de los productos sobre la acumulación, sin embargo, existe una tendencia a la disminución de la concentración de cadmio, con la aplicación de todos los productos utilizados en esta investigación.

VI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en la investigación hacemos las siguientes recomendaciones:

1. Elaborar un mapeo del campo experimental previo con los parámetros de principal importancia para delimitar las áreas homogéneas donde se va a realizar la investigación.
2. Debido a la alta variabilidad que presenta un sistema agroforestal en condiciones de selva se debería realizar mayores investigaciones con una mayor cantidad de evaluaciones y repeticiones.
3. Realizar el análisis de concentración de cadmio, en las mazorcas y sus componentes, a muestras compuestas del conjunto de mazorcas de un árbol y conjunto de árboles, para disminuir la variabilidad presente de este elemento.
4. Realizar trabajos de investigación con evaluaciones secuenciales por etapa fenológica de desarrollo y maduración, relacionado a la acumulación de cadmio, para comprender mejor el comportamiento de absorción de este elemento en la mazorca y sus componentes.
5. Realizar mayores investigaciones con respecto a la movilidad del cadmio en el suelo en sistemas agroforestales de cacao para comprender mejor que propiedad o condiciones tienen mayor influencia en su movilidad.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, M. (2016). Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2978>
- Adriano, D. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of of metals (2da ed.). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of the Total Environment*, 605–606(October), 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*, 649, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>
- Balta, R. (2019). El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (*Solaneum lycopersicum* L.) bajo el invernadero. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Basta, N. T., Ryan, J. A., & Chaney, R. L. (2005). Trace Element Chemistry in Residual-Treated Soil: OF TRACE ELEMENTS WITH COMMON Trace Element Reaction with Iron. *Adsorption Journal Of The International Adsorption Society*, 49–63

- Batista, L. (2009). *Guía Técnica el Cultivo de Cacao en la República Dominicana*. Santo Domingo, República Dominicana. CEDAF, 2009. 250pp.
- Benavides, M. P., Gallego, S. M., & Tomaro, M. L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 21–34. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>
- Bridgemohan, P., Mohammed, M., Kimberly Singh, & Ronell Shamir Hemsley Bridgemohan. (2016). The Application of BBCH Scale for Codification and Illustrations of the Floral Stages of Caribbean Fine Cacao *Theobroma cacao* L. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, 6(1). <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2016.01.001>
- Buekers, J., Liesbeth, V. L., Amery, F., Soul, V. B., Maes, A., & Smolders, E. (2007). Role of soil constituents in fixation of soluble Zn, Cu, Ni and Cd added to soils. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00958.x>
- CAOBISCO, AEC, & FCC. (2015). *Cacao en Grano: Requisitos de Calidad de la Industria del Chocolate y del Cacao*. In *Revista Brasileira de Medicina* (Vol. 69, Issue 12). [http://www.cocoaquality.eu/data/Cacao en Grano Requisitos de Calidad de la Industria Apr 2016_es.pdf](http://www.cocoaquality.eu/data/Cacao%20en%20Grano%20Requisitos%20de%20Calidad%20de%20la%20Industria%20Apr%202016_es.pdf)
- Cárdenas, A. (2012). Presencia del CADMIO en algunas parcelas de cacao orgánico en la cooperativa Agraria Industrial Naranjillo - Tingo María - Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153>
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Baligar, V. C. (2016). Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*, 150(May 2018), 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.013>
- Chen, Z. (2000). RELATIONSHIP BETWEEN HEAVY METAL CONCENTRATIONS IN SOILS OF TAIWAN AND UPTAKE BY CROPS. *Trace Elements in the Soil Contamination of Rural Soils. Agricultural Chemistry*, 1–15. <http://www.fftc.agnet.org/library/tb/149/tb149.pdf>
- Clemens, S. (2006). Evolution and function of phytochelatin synthases. *Journal of Plant Physiology*, 163(3), 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.11.01>

- Cuenca, E. C. (2012). Efecto de la materia orgánica y fuentes de calcio en la toxicidad de cadmio en maiz (*Zea mays* L.). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.
- DalCorso, G., Farinati, S., Maistri, S., & Furini, A. (2008). How plants cope with cadmium: Staking all on metabolism and gene expression. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(10), 1268–1280. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00737.x>
- Degryse, F., Smolders, E., & Parker, D. R. (2009). Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications - a review. *European Journal of Soil Science*, 60(4), 590–612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01142.x>
- Dong, J., Mao, W. H., Zhang, G. P., Wu, F. B., & Cai, Y. (2007). Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity - A review. *Plant, Soil and Environment*, 53(5), 193–200. <https://doi.org/10.17221/2205-pse>
- Doster, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M., & Weigend, M. (2012). Hoja botánica: Cacao. *Theobroma cacao* L.
- García, O. (2002). Efectos biológicos de campos magnéticos de muy baja frecuencia y radiofrecuencia en presencia de metales pesados: cadmio y mercurio [Universidad Complutense De Madrid]. <https://doi.org/ISBN:978-84-693-1123-3>
- Gomez, R. A., Garcia, R. B., Tong, F., & Gonzalez, C. H. (2014). Paquete tecnológico del cultivo del cacao fino de aroma. *P Aquete Tecnológico*, 70 p. https://issuu.com/devida-peru/docs/paquete_tecnologico_cultivo_cacao
- Gonçalves, J. F., Antes, F. G., Maldaner, J., Pereira, L. B., Tabaldi, L. A., Rauber, R., Rossato, L. V., Bisognin, D. A., Dressler, V. L., de Moraes Flores, É. M., & Nicoloso, F. T. (2009). Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(9), 814–821. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.04.002>
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M., & Schulin, R. (2016). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of the Total Environment*, 580, 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of the Total Environment*, 612, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>

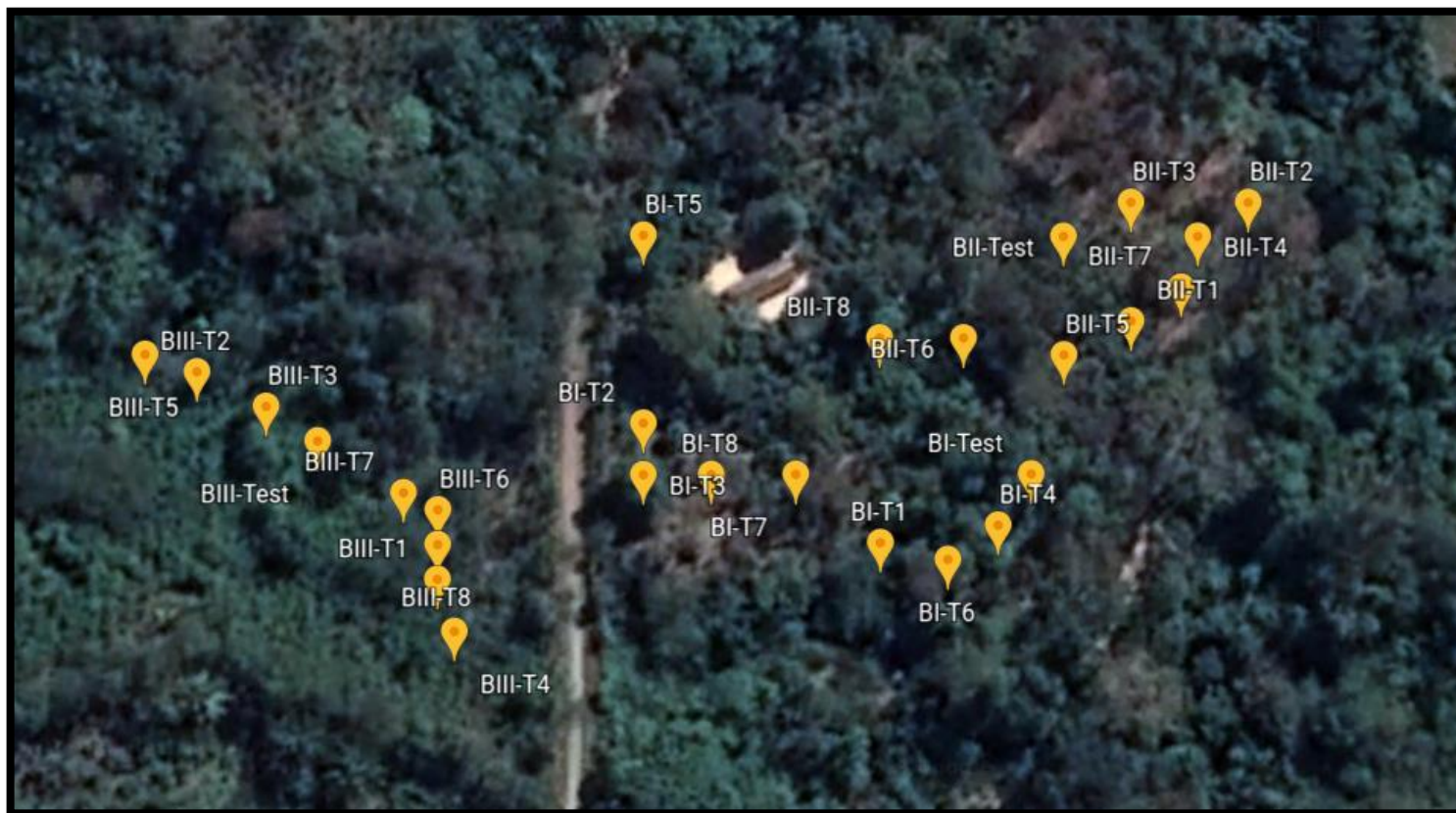
- Gutiérrez, B. (2011). Estudio agromorfológico y fisicoquímico de los ecotipos de cacao cultivados en los municipios de Izalco y Nahulingo, en el departamento de Sonsonate en El Salvador. UNIVERSIDAD Dr. JOSE MATIS DELGADO.
- HE, S., YANG, X., HE, Z., & BALIGAR, V. C. (2017). Morphological and Physiological Responses of Plants to Cadmium Toxicity: A Review. *Pedosphere*, 27(3), 421–438. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60339-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60339-4)
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. In *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition (3ra ed.)*. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Krämer, U. (2010). Metal hyperaccumulation in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 517–534. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112156>
- Kranner, I., & Colville, L. (2011). Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 72(1), 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.005>
- Krzesłowska, M., Lenartowska, M., Samardakiewicz, S., Bilski, H., & Woźny, A. (2010). Lead deposited in the cell wall of *Funaria hygrometrica* protonemata is not stable - A remobilization can occur. *Environmental Pollution*, 158(1), 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.035>
- León, J. (1987). *Botánica de los cultivos tropicales (I. I. de cooperación para la agricultura (IICA) (ed.); 2da ed.)*.
- Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Naidu, R. (2012). Cadmium sorption and desorption in soils: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(5), 489–533. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.520234>
- Map, T. (2018). Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas. https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=3%7C604%7C%7C%7C%7C18%7C%7C%7C2%7C1%7C1%7C2%7C1%7C%7C2%7C1%7C1
- Mäser, P., Thomine, S., Schroeder, J. I., Ward, J. M., Hirschi, K., Sze, H., Talke, I. N., Amtmann, A., Maathuis, F. J. M., Sanders, D., Harper, J. F., Tchieu, J., Gribskov, M., Persans, M. W., Salt, D. E., Kim, S. A., & Guerinot, M. L. (2001). Phylogenetic relationships within cation transporter families of *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 126(4), 1646–1667. <https://doi.org/10.1104/pp.126.4.1646>

- Medina, J. D. L. C., Vargas, O., & Coronel, D. A. (2009). CACAO: Operaciones Poscosecha. Instituto Tecnológico de Veracruz, 1–78. <http://www.fao.org/3/a-au995s.pdf>
- Mengel, K., Kirkby, E. a., Kosegarten, H., & Appel, T. (2001). Principles of Plant Nutrition Edited by and (Vol. 5th). <https://doi.org/DOI.10.1016/j.jas.2013.07.021>
- Meter, A., Atkinson, R., & LAbiberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de America Latina y el Caribe. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C., Gerhard, F., & Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2.
- Mite, F., Carrillo, M., & Durando, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas de ecuador. Xii Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo, November, 17–19.
- Navarro, S., & Navarro, G. (2003). *Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (2da ed.). file:///C:/Users/youhe/Downloads/kdoc_o_00042_01.pdf
- OEE-Minagri. (2018). Serie de estadística de producción agraria (SEPA). <http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=salida>
- Perfus-Barbeoch, L., Leonhardt, N., Vavasseur, A., & Forestier, C. (2002). Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *Plant Journal*, 32(4), 539–548. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01442.x>
- Ramos, G., Ramos, P., & Azócar, A. (2000). *Manual del productor de cacao*. Producciones Karol.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Remigio, J. (2015). Determinación y zonificación de las fuentes contaminantes que afectan la concentración de cadmio en los granos de cacao en las organizaciones socias de CEPICAFE de Piura y Tumbes. http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/01-Jose-Remigio_PROY_DETERMINACION_Y_ZONIF_FUENTES_CONTAMIN_EN_GRANOS_DE_CAFE.pdf

- Rodríguez, H. (2017). Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca [UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62944>
- Romero, C. (2016). Estudio del CACAO en el Perú y en el mundo. Un análisis de la producción y el comercio. MINAGRI-DEEIA, 1–90.
- Roth, I., & Lindorf, H. (1971). DESARROLLO Y ANATOMIA DEL FRUTO Y DE LA SEMILLA DE THEOBROMA CACAO. <https://www.jstor.org/stable/41740588>
- Sánchez, G. (2016). Ecotoxicología Del Cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. [UNIVERSIDAD COMPLUTENSE]. http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA_SANCHEZ_BARRON.pdf
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Khan, N., & Antunes, P. (2016). Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 238, Issue December). <https://doi.org/10.1007/398>
- Solís, M. (2014). DISPONIBILIDAD DE Pb, Cd Y Ni POR LA ADICIÓN DE FÓSFORO Y AZUFRE EN SUELOS REGADOS CON AGUA RESIDUAL, EN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO. INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS.
- Suzuki, N. (2005). Alleviation by calcium of cadmium-induced root growth inhibition in *Arabidopsis* seedlings. *Plant Biotechnology*, 22(1), 19–25. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.22.19>
- Tantalean, E., & Huauya, M. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de Investigación En Agroproducción Sustentable*, 1(2), 69–78. <https://doi.org/10.25127/aps.20172.199>
- UE. (2014). Reglamento (UE) N° 488/2014 De la comisión de 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. *EFSA Journal*, 9(2), 10–14. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Croquis de la distribución de los tratamientos en el campo experimental.



ANEXO 2: Desarrollo radicular en los diferentes tratamientos.

BLOQUE	TRAT	RAICILLAS ACTIVAS			RAICILLAS TOTALES		
		g	FC*	gr/m3	g	FC*	gr/m3
BI	TEST	0.5	0.0095	57.4	3.1	0.0095	325.3
	T1	1.5		153.2	3.5		372.1
	T2	2.2		230.0	4.7		495.8
	T3	1.9		195.3	3.7		387.9
	T4	0.8		78.9	2.8		297.4
	T5	2.6		270.5	6.1		638.9
	T6	1.6		170.0	3.7		392.0
	T7	1.9		199.5	4.6		487.9
	T8	2.3		240.0	4.4		466.3
BII	TEST	1.7	0.0095	182.6	4.1	0.0095	430.0
	T1	1.3		139.5	4.9		511.6
	T2	1.4		142.6	3.2		341.1
	T3	1.6		167.4	4.2		443.7
	T4	1.5		157.4	5.2		548.9
	T5	0.7		76.8	4.9		518.4
	T6	1.1		116.8	3.1		322.1
	T7	1.3		138.9	3.0		318.9
	T8	1.5		155.8	3.7		391.1
BIII	TEST	1.1	0.0095	118.9	3.5	0.0095	364.7
	T1	1.7		174.7	5.5		579.5
	T2	2.1		219.5	3.9		406.8
	T3	1.0		110.0	3.1		323.2
	T4	1.7		182.1	5.0		528.4
	T5	1.6		170.5	3.9		415.3
	T6	2.1		223.7	4.4		462.1
	T7	2.3		241.1	5.9		616.3
	T8	2.4		251.6	5.3		554.7

*Factor de conversión del volumen total de suelo extraído con el cilindro para obtener el peso seco de raicillas por metro cubico de suelo.

ANEXO 3: Desarrollo radicular en diferentes dosis de los productos.

A) Efecto de la aplicación de Avical en el peso seco de raicillas.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Peso seco (g. m⁻³)	
		Raicillas activas	Raicillas totales
TESTIGO	0	120.0	372.6
SIN AVICAL	0	162.1	435.8
CON AVICAL	20	174.7	449.5
C. V.		49.16%	30.54%

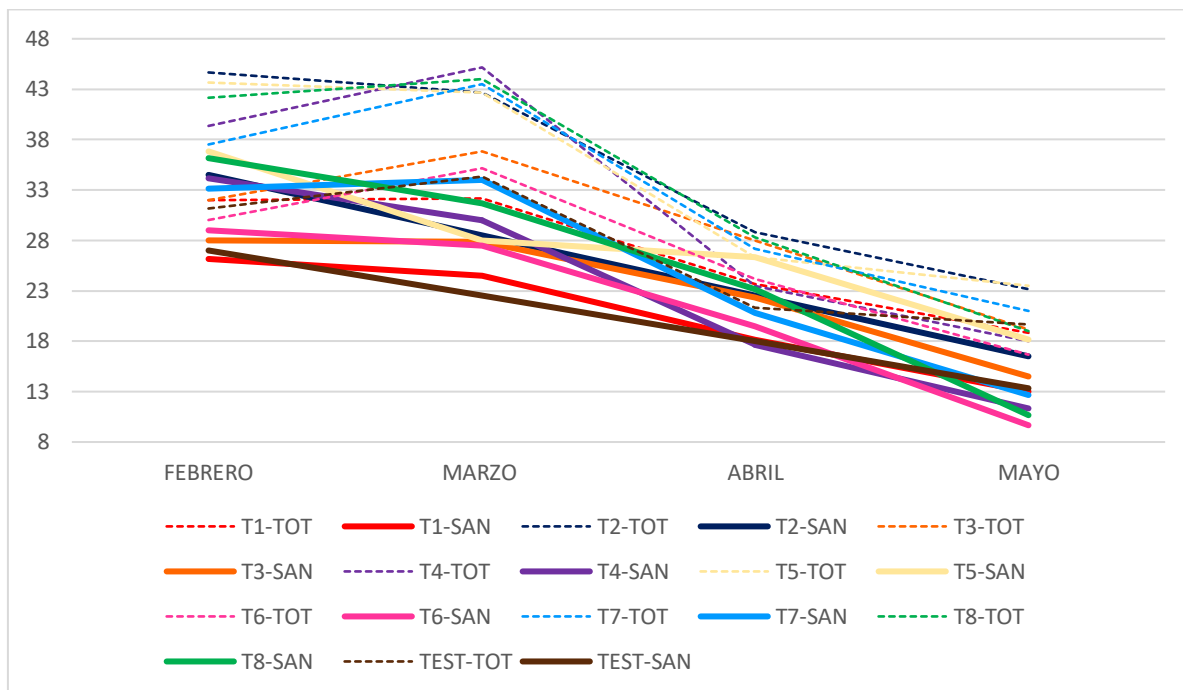
B) Efecto de la aplicación de Avibiol en el peso seco de raicillas.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Peso seco (g. m⁻³)	
		Raicillas activas	Raicillas totales
TESTIGO	0	120.0	372.6
AVIBIOL	120	161.1	438.9
AVIBIOL	240	176.8	447.4
C. V.		40.09%	30.56%

C) Efecto de la aplicación de Carbón Liquido Monty's en el peso de raicillas.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Peso seco (g. m⁻³)	
		Raicillas activas	Raicillas totales
TESTIGO	0	120.0	372.6
CARBÓN L.	8	170.5	467.4
CARBON L.	16	167.4	417.9
C. V.		49.3%	30.06%

ANEXO 4: Número de mazorcas totales y sanas por planta entre los meses de febrero y mayo en los diferentes tratamientos aplicados.



Tx-TOT: Número de mazorcas totales del tratamiento “x”, **Tx-SAN:** Número de mazorcas sanas del tratamiento “x”.

ANEXO 5: Número de mazorcas sanas en diferentes dosis de los productos.

A) Efecto de la aplicación de Avical en el número de mazorcas sanas entre los meses de febrero y mayo.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Número de mazorcas			
		Febrero	Marzo	Abril	Mayo
TESTIGO	0	27.0	22.5	18.0	13.3
SIN AVICAL	0	30.7	27.7	20.2	13.8
CON AVICAL	20	33.8	30.3	21.1	12.8
C. V.		35.06%	36.72%	37.46%	56.85%

B) Efecto de la aplicación de Avibiol en el número de mazorcas sanas entre los meses de febrero y mayo.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Número de mazorcas			
		Febrero	Marzo	Abril	Mayo
TESTIGO	0	27.0	22.5	18.0	13.3
AVIBIOL	120	31.6	27.1	20.3	14.3
AVIBIOL	240	32.9	30.9	21.0	12.3
C. V.		35.33%	36.41%	37.48%	56.49%

C) Efecto de la aplicación de Carbón Liquido Monty's en el número de mazorcas sanas entre los meses de febrero y mayo.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Número de mazorcas			
		Febrero	Marzo	Abril	Mayo
TESTIGO	0	27.0	22.5	18.0	13.3
CARBÓN L.	8	31.0	28.6	20.5	14.6
CARBÓN L.	16	33.4	29.4	20.7	12.0
C. V.		35.18%	36.97%	37.52%	56.19%

ANEXO 6: Análisis de varianza del peso seco de 30 almendras cosechadas de los diferentes tratamientos aplicados.

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P	
Tratamientos	8	570.52	71.315	2.5518	0.02268	*
Bloques	2	5.03	2.514	0.0899	0.91415	
Error	43	1201.7	27.947			

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 7: Peso seco de 30 almendras y cosecha acumulada en diferentes dosis de los productos.

A) Efecto de la aplicación de Avical en el peso seco de 30 almendras y la cosecha acumulada entre mayo y junio.

Producto Comercial	Dosis	PESO DE 30 ALMENDRAS	COSECHA ACUMULADA
	(L/ha)	(g)	(kg/ha)
TESTIGO	0	37.5	814.7
SIN AVICAL	0	40.7	823.9
CON AVICAL	20	43.9	944.4
C. V.		13.35%	28.22%

B) Efecto de la aplicación de Avibiol en el peso seco de 30 almendras y la cosecha acumulada entre mayo y junio.

Producto Comercial	Dosis	PESO DE 30 ALMENDRAS	COSECHA ACUMULADA
	(L/ha)	(g)	(kg/ha)
TESTIGO	0	37.5	814.7
AVIBIOL	120	40.9	840.9
AVIBIOL	240	43.7	927.4
C. V.		13.49%	28.62%

C) Efecto de la aplicación de Carbón Líquido Monty's en el peso seco de 30 almendras y la cosecha acumulada entre mayo y junio.

Producto Comercial	Dosis	PESO DE 30 ALMENDRAS	COSECHA ACUMULADA
	(L/ha)	(g)	(kg/ha)
TESTIGO	0	37.5	814.7
CARBÓN L.	8	41.9	865.5
CARBÓN L.	16	42.7	902.7
C. V.		13.85%	28.95%

ANEXO 8: Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en la mazorca para el mes de marzo en los diferentes tratamientos aplicados.

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
Tratamientos	8	0.06902	0.00863	0.3914	0.9095
Bloques	2	0.00845	0.00423	0.1918	0.8274
Error	16	0.35267	0.02204		

Nivel de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 9: Contenido de cadmio en el mes de marzo en diferentes dosis de los productos.

A) Efecto de la aplicación de Avical en la concentración de cadmio en la mazorca en el mes de marzo.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Contenido de cadmio en la mazorca (ppm)
TESTIGO	0	0.24
SIN AVICAL	0	0.15
CON AVICAL	20	0.14
C. V.		86.24%

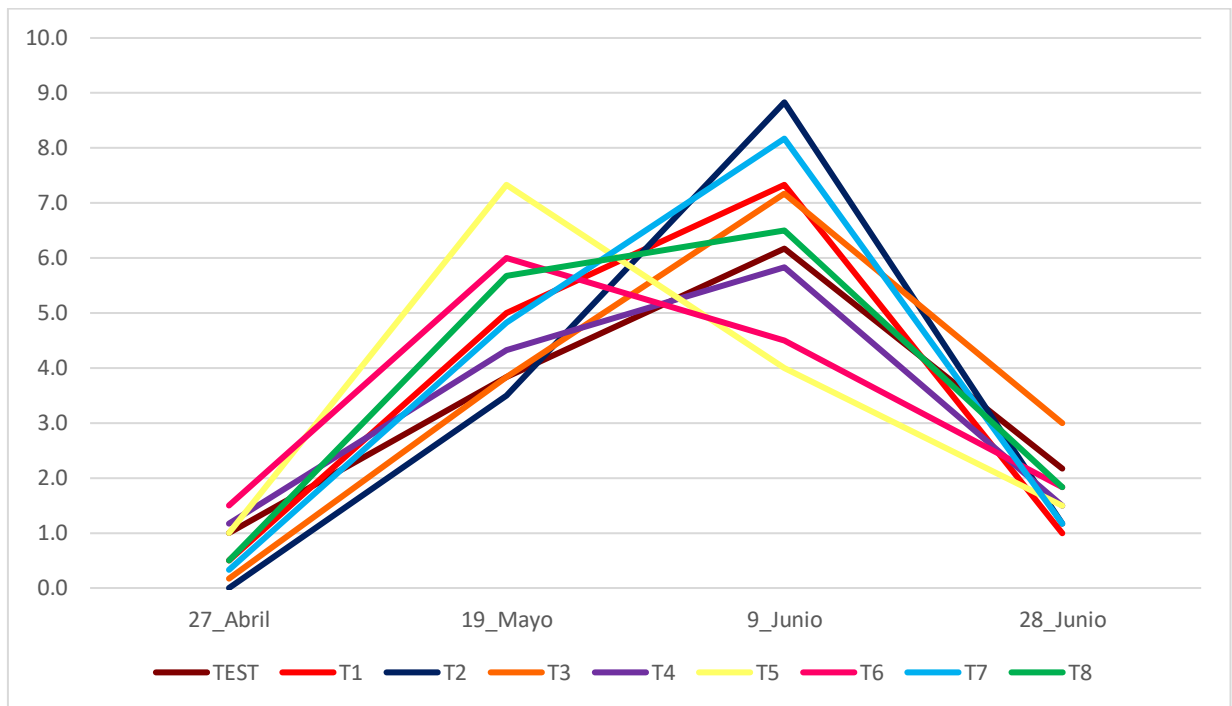
B) Efecto de la aplicación de Avibiol en la concentración de cadmio en la mazorca en el mes de marzo.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Contenido de cadmio en la mazorca (ppm)
TESTIGO	0	0.24
AVIBIOL	120	0.17
AVIBIOL	240	0.12
C. V.		84.63%

C) Efecto de la aplicación de Carbón Liquido Monty's en la concentración de cadmio en la mazorca en el mes de marzo.

Producto Comercial	Dosis (L/ha)	Contenido de cadmio en la mazorca (ppm)
TESTIGO	0	0.24
CARBÓN L.	8	0.15
CARBÓN L.	16	0.14
C. V.		86.27%

ANEXO 10: Número de mazorcas extraídas en las cuatro cosechas entre mayo y junio.



ANEXO 11: Concentración de cadmio en las diferentes evaluaciones realizadas.

BLOQUE	TRAT	MARZO	MAYO	JUNIO			
		Cd (ppm) mazorca	Cd (ppm) almendra**	Cd (ppm) cáscara	Cd (ppm) cascarilla	Cd (ppm) almendra	Cd (ppm) grano**
BI	TEST	0.288	0.375	1.790	0.125	1.605	3.600
	T1	0.294	nsd	0.880	0.135	1.105	nsd
	T2	0.225	nsd	0.590	0.195	0.580	nsd
	T3	0.233	0.080	0.615	0.135	0.490	1.010
	T4	0.100	0.615	0.770	0.210	1.360	2.040
	T5	0.073	nsd	0.600	0.220	0.670	nsd
	T6	0.223	nsd	1.030	0.150	1.550	nsd
	T7	0.059	0.265	0.750	0.175	0.875	0.855
BII	TEST	0.038	1.415	1.130	0.405	0.405	0.850
	T1	0.165	nsd	1.140	0.080	0.750	nsd
	T2	0.094	nsd	1.540	0.595	0.480	nsd
	T3	0.053	1.420	1.065	0.295	0.490	1.115
	T4	0.158	1.810	1.200	0.440	0.585	0.780
	T5	0.458	nsd	2.185	0.375	0.675	nsd
	T6	0.030	nsd	1.580	0.415	0.880	nsd
	T7	0.075	0.610	1.070	0.355	0.590	0.840
BIII	TEST	0.387	0.330	0.565	0.290	0.420	0.530
	T1	0.104	nsd	0.615	0.195	0.450	nsd
	T2	0.349	nsd	0.800	0.295	0.410	nsd
	T3	0.024	0.320	0.625	0.525	0.615	1.250
	T4	0.030	0.285	0.700	0.360	0.435	0.545
	T5	0.008	nsd	0.480	0.365	0.520	nsd
	T6	0.038	nsd	0.450	0.400	0.395	nsd
	T7	0.274	0.380	0.440	0.220	0.550	0.665
T8	0.019	0.240	0.400	0.335	0.460	0.680	

Nsd: No se realizó evaluación para ese tratamiento.

** : Análisis complementario.

ANEXO 12: Análisis de varianza de la concentración de cadmio en los componentes de la mazorca: cascara, cascarilla con mucílago y almendra, para el mes de marzo.

Cáscara

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P	
Tratamientos	8	0.54209	0.06776	0.7928	0.6168	
Bloques	2	1.87537	0.93768	10.9707	0.0010	**
Error	16	1.36755	136.91			

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Cascarilla con mucílago

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P	
Tratamientos	8	0.10815	0.01352	1.2906	0.315019	
Bloques	2	0.15047	0.07523	7.1822	0.005944	**
Error	16	0.16760	0.01047			

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Almendra

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P	
Tratamientos	8	0.51038	0.06380	0.9189	0.52618	
Bloques	2	1.38492	0.69246	9.9736	0.00154	**
Error	16	1.11088	0.06943			

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 13: Contenido de cadmio en el mes de junio en diferentes dosis de los productos.

A) Efecto de la aplicación de Avical en la concentración de cadmio en los componentes de la mazorca en el mes de junio.

Producto Comercial	Dosis	Contenido de cadmio (ppm)		
	(L/ha)	Cáscara	Cascarilla con mucílago	Almendra
TESTIGO	0	1.16	0.27	0.81
SIN AVICAL	0	0.88	0.29	0.68
CON AVICAL	20	0.92	0.30	0.78
C. V.		43.83%	38.07%	52.89%

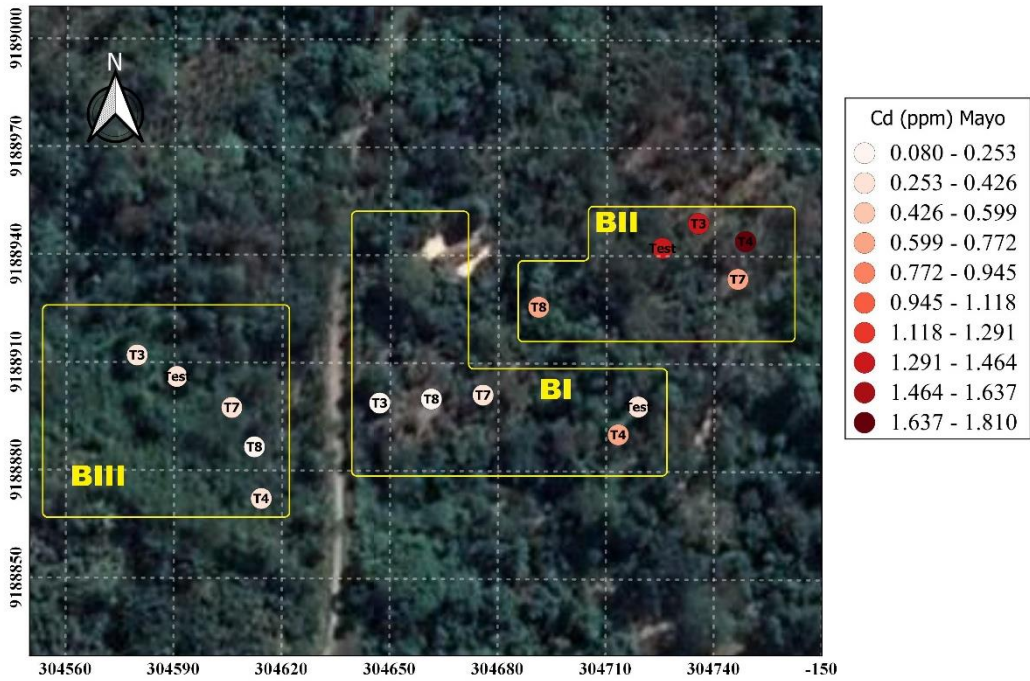
B) Efecto de la aplicación de Avibiol en la concentración de cadmio en los componentes de la mazorca en el mes de junio.

Producto Comercial	Dosis	Contenido de cadmio (ppm)		
	(L/ha)	Cáscara	Cascarilla con mucílago	Almendra
TESTIGO	0	1.16	0.27	0.81
AVIBIOL	120	1.03	0.28	0.77
AVIBIOL	240	0.77	0.30	0.69
C. V.		41.38%	37.98%	53.01%

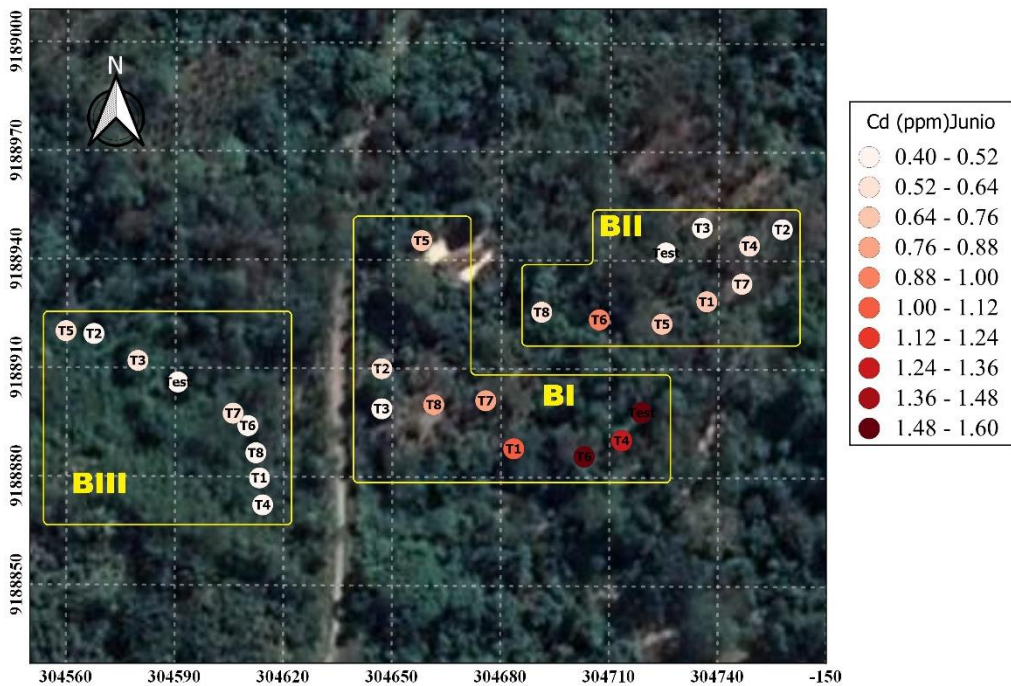
C) Efecto de la aplicación de Carbón Líquido Monty's en la concentración de cadmio en los componentes de la mazorca en el mes de junio.

Producto Comercial	Dosis	Contenido de cadmio (ppm)		
	(L/ha)	Cáscara	Cascarilla con mucílago	Almendra
TESTIGO	0	1.16	0.27	0.81
CARBÓN L.	8	0.91	0.26	0.65
CARBÓN L.	16	0.89	0.33	0.81
C. V.		43.88%	35.53%	52.01%

ANEXO 14: Distribución espacial de la concentración de cadmio en almendras cosechadas en los diferentes tratamientos para el mes de mayo.



ANEXO 15: Distribución espacial de la concentración de cadmio en almendras cosechadas en los diferentes tratamientos para el mes de junio.



ANEXO 16: Análisis de varianza de la concentración de cadmio en almendras cosechadas en las evaluaciones complementarias en los meses de mayo y junio.

Mes mayo-almendras de cacao

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
Tratamientos	4	0.5604	0.1401	1.3227	0.3403
Bloques	2	3.6786	1.8393	17.366	0.0012 **
Error	8	0.8473	0.1060		

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Mes junio-granos de cacao (almendras más cascarilla)

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
Tratamientos	4	1.4737	0.3684	0.6263	0.6571
Bloques	2	2.3884	1.1941	2.0302	0.1936
Error	8	4.0706	0.5882		

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 17: Análisis de regresión entre la variable concentración de cadmio y concentración de calcio para el mes de mayo.

Coefficientes

	Estimado	Std. Error	T valor	Pr(> t)
(Intercepto)	2.0141	0.730	2.757	0.0163 *
Ca-mayo	-11.9731	6.114	-1.958	0.0720 .

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Error Residual estándar: 0.4747 en 13 grados de libertad

Múltiple R-cuadrado: 0.2278, Ajustado R-cuadrado: 0.168

F-estadístico: 3.835 en 1 y 52 GL, p-valor: 0.072

ANEXO 18: Análisis de varianza entre la variable concentración de cadmio y concentración de calcio para el mes de mayo.

Respuesta: PS total de almendras

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
Ca-mayo	1	0.8640	0.8640	3.8352	0.072
Error	13	2.9288	0.2253		

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 19: Análisis de regresión entre la variable peso seco de raicillas totales y peso seco de la cosecha acumulada.

Coefficientes

	Estimado	Std. Error	T valor	Pr(> t)
(Intercepto)	591.8	111.0	5.329	2.16e-06 ***
Raicillas totales	68.8	25.7	2.667	0.00991 **

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Error Residual estándar: 235.9 en 52 grados de libertad

Múltiple R-cuadrado: 0.1211, Ajustado R-cuadrado: 0.1042

F-estadístico: 7.166 en 1 y 52 GL, p-valor: 0.009914

ANEXO 20: Análisis de varianza entre la variable peso seco de raicillas totales y peso seco de la cosecha acumulada.

Respuesta: PS total de almendras

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
PS raicillas totales	1	398864	39886	7.1665	0.009914 **
Error	52	289417	55657		

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 21: Análisis de regresión entre la variable peso seco de raicillas totales y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

Coefficientes

	Estimado	Std. Error	T valor	Pr(> t)	
(Intercepto)	1.4749	0.20727	7.116	3.23e-09	***
Raicillas totales	-0.17763	0.04797	-3.703	0.00051	***

Nivel de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Error Residual estándar: 0.4403 en 52 grados de libertad

Múltiple R-cuadrado: 0.2087, Ajustado R-cuadrado: 0.1935

F-estadístico: 13.71 en 1 y 52 GL, p-valor: 0.000516

ANEXO 22: Análisis de varianza entre la variable peso seco de raicillas totales y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

Respuesta: Concentración de cadmio en almendras

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P	
PS raicillas totales	1	2.6586	2.6586	13.713	0.000516	***
Error	52	10.081	0.1938			

Nivel de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 23: Análisis de regresión entre la variable peso seco cosechado y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

Coefficientes

	Estimado	Std. Error	T valor	Pr(> t)	
(Intercepto)	0.8814	0.12920	6.822	9.52e-09	***
PS-junio	-0.00035	0.00028	-1.274	0.208	

Nivel de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Error Residual estándar: 0.4874 en 52 grados de libertad

Múltiple R-cuadrado: 0.03025, Ajustado R-cuadrado: 0.01161

F-estadístico: 1.622 en 1 y 52 GL, p-valor: 0.2084

ANEXO 24: Análisis de varianza entre la variable peso seco cosechado y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

Respuesta: Concentración de cadmio en almendras

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
PS-junio	1	0.3854	0.3854	1.6223	0.2084
Error	52	12.354	0.2376		

Nivel de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 25: Análisis de regresión entre la variable concentración de calcio y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

Coefficientes

	Estimado	Std. Error	T valor	Pr(> t)
(Intercepto)	0.6604	0.7039	0.938	0.357
Ca-junio	0.3675	7.7278	0.048	0.962

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Error Residual estándar: 0.347 en 25 grados de libertad

Múltiple R-cuadrado: 9.045e-05, Ajustado R-cuadrado: -0.03991

F-estadístico: 0.002262 en 1 y 25 GL, p-valor: 0.9624

ANEXO 26: Análisis de varianza entre la variable concentración de calcio y la concentración de cadmio en almendra para el mes de junio.

Respuesta: Concentración de cadmio en almendras

	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
Ca-junio	1	0.00027	0.00027	0.0023	0.9624
Error	25	3.00591	0.12023		

Nivel de significancia: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1