

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE
DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



Tesis

“Evaluación de los niveles de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**

Autor:

Bachiller: CCANQUE PACCO, Richard

ASESOR:

Dr. PEÑA VALDEIGLESIAS, Joel

A handwritten signature in blue ink, appearing to be the signature of the advisor, Dr. Peña Valdeiglesias, Joel.

Puerto Maldonado, octubre 2024

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE
DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



Tesis

“Evaluación de los niveles de cadmio en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**

Autor:

Bachiller: CCANQUE PACCO, Richard

ASESOR:

Dr. PEÑA VALDEIGLESIAS, Joel

Puerto Maldonado, octubre 2024

TURNITIN_RICHARD CCANQUE PACCO

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios Trabajo del estudiante	1%
3	repositorio.unaj.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
5	cgspace.cgiar.org Fuente de Internet	1%
6	repositorio.ucss.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unamad.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	1%
9	purl.org Fuente de Internet	

PRESENTACIÓN

En los últimos años el departamento de Madre de Dios está tomando fuerza con respecto a la producción de cacao, es así, que ya se tiene registros de cientos de toneladas exportadas a los diferentes mercados extranjeros. Uno de los problemas latentes y posibles cierres de algunos mercados internacionales es la presencia de cadmio en los granos de cacao, siendo este metal perjudicial para la salud humana, produciendo posible problema renal y asociado a un alto riesgo de contraer cáncer. Se sabe que este metal llega al cuerpo a través de la alimentación, sobre todo de alimentos de origen vegetal como el cacao.

En la literatura se encuentran diversas investigaciones respecto al contenido y distribución de cadmio en los países productores cacao, también se encuentran investigaciones realizadas en el Perú. En este estudio nos enfocaremos en conocer cantidad de cadmio en algunos distritos de la provincia de Tambopata en el departamento de Madre de Dios, ya que no se ha podido encontrar estudios de cadmio en este departamento. Adicionalmente, se estudiará la distribución de cadmio en los diferentes niveles o profundidades del suelo de las mismas parcelas de cacao.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar los niveles de cadmio en sistemas agroforestales con cacao en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios. Se selecciono 30 localidades con sistemas agroforestales con cacao distribuidos en los distritos de Tambopata, Inambari y Laberinto. Se muestreo el suelo en tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm) para determinar la concentración de cadmio presente. Se muestrearon los órganos vegetativos del cacao, para esto se recolectaron cuatro plantas de cacao ubicados alrededor de los puntos de muestreo de suelo. Se realizo comparaciones de concentración de cadmio en los tres distritos mediante análisis univariante paramétricos y no paramétricos. Se encontró una tendencia creciente de concentración de cadmio en los suelos a mayores profundidades del suelo. Los tres distritos superaron el límite máximo permitido de concentración de cadmio en suelos por la United States Environmental Protection Agency (0,43 mg/kg). Las localidades que compartieron mayor similitud en concentración de cadmio en los órganos vegetativos fueron Santo domingo y florida alta. Los clones CCN51/CRIOLLO, VRAE15/VRAE99/CCN51, CHUNCHO/CCN51 son los que menos cadmio acumularon en las semillas, no superando el límite máximo permitido (0,60 mg/kg). El órgano vegetativo que más acumulo cadmio fue las hojas. Los suelos de los tres distritos están categorizados como suelos contaminados por cadmio.

Palabras clave: contaminación de cadmio, órganos vegetativos, clones de cacao, nivel máximos permitidos

ABSTRACT

The present study aims to evaluate cadmium levels in cocoa agroforestry systems in three districts of the Tambopata province in the Madre de Dios region. Thirty localities were selected with agroforestry systems with cocoa distributed in the districts of Tambopata, Inambari and Laberinto. The soil was sampled at three depths (0-30, 30-60 and 60-90 cm) to determine the concentration of cadmium present. Cacao vegetative organs were sampled by collecting four cacao plants located around the soil sampling points. Comparisons of cadmium concentration in the three districts were made using univariate parametric and non-parametric analyses. An increasing trend of cadmium concentration in soils was found at greater soil depths. All three districts exceeded the maximum allowable limit of cadmium concentration in soils by the United States Environmental Protection Agency (0.43 mg/kg). The locations that shared the greatest similarity in cadmium concentration in vegetative organs were Santo Domingo and Florida Alta. The clones CCN51/CRIOLLO, VRAE15/VRAE99/CCN51, CHUNCHO/CCN51 accumulated the least cadmium in the seeds, not exceeding the maximum permitted limit (0.60 mg/kg). The vegetative organ that accumulated the most cadmium was the leaves. The soils of the three districts are categorised as cadmium contaminated soils.

Key words: cadmium contamination, vegetative organs, cocoa clones, maximum permissible levels

INTRODUCCIÓN

La presencia de cadmio en el cacao y su reglamentación por parte de las autoridades al poner límites tolerables de este metal en el cacao y sus derivados, es un tema preocupante para los países productores, y para miles de pequeños productores del Perú. El departamento de Madre de Dios tuvo una producción de cacao de 1512,09 toneladas en el 2021 (MINAM 2017), también, se siente la preocupación de la presencia de cadmio en el cacao por parte de los productores en Madre de Dios. Teniendo conocimiento que este metal llega al cuerpo humana a través de la alimentación, pudiendo causar insuficiencia renal y alto riesgo de contraer cáncer (EFSA 2012).

Se han realizado estudios en diferentes países productores de cacao sobre el contenido de cadmio en partes de cacao y suelo, en parcelas con plantaciones de cacao, con la finalidad de conocer la distribución y concentración de cadmio, en Honduras (Gramlich et al. 2018), en Ecuador (Argüello et al. 2019) y (Chavez et al. 2015) y También en Perú (Zug et al. 2019), además, estos autores estudiaron la influencia o la relación que tiene la concentración de cadmio presente en el suelo y el efecto del uso de fertilizantes en la concentración final de cadmio en el cacao.

En la región de Madre de Dios no hay estudios publicados sobre la cantidad de cadmio presente en el suelo y partes de cacao, esto teniendo conocimiento que ya es exportador de granos de cacao. En ese sentido, el objetivo de este estudio es evaluar los niveles de cadmio de cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios

INDICE

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Variables	2
1.4.1. Variable independiente.....	2
1.4.2. Variables dependientes.....	2
1.5. Operacionalización de variables	2
1.6. Hipótesis.....	3
1.7. Justificación	3
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes de estudio	5
2.2. Bases teóricas.....	6
2.2.1. El cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>).....	6
2.2.3. Seguridad alimentaria metales pesados	10
2.2.5. Contenido de cadmio en suelo y en el cacao.....	12
2.2.6. Límites máximos de Cadmio	14
CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	15
3.1. Tipo de estudio.....	15
3.2. Diseño del estudio	15
3.3. Lugar de ejecución	15
3.4. Población y muestra.....	16
3.5. Métodos y técnicas.....	16

3.5.1. Materiales, reactivos y equipos.....	16
3.5.2. Métodos de análisis	17
3.5.3. Metodología experimental.....	17
3.6. Tratamiento de los datos	19
CAPITULO IV. RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACION	20
4.1. Bioacumulación de cadmio en partes vegetativas del cacao.....	20
4.1.1. Bioacumulación en hojas.....	20
4.2.1. Bioacumulación en cascara	21
4.2.2. Bioacumulación en raíz.....	21
4.2.3. Bioacumulación en semillas	22
4.2. Variación de concentración de cd en clones de Cacao	24
4.3. Niveles cadmio en los suelos en sistemas agroforestales con cacao de tres distritos de Tambopata en la región Madre de Dios.....	27
CONCLUSIONES	32
SUGERENCIAS.....	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
ANEXOS.....	42

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Árbol, vaina y semilla de cacao.	10
Figura 2. Mapa de ubicación de áreas a estudiar.	15
Figura 3. Flujograma de estudio.	17
Figura 4. Bioacumulación de Cd en las hojas de cacao	20
Figura 5. Bioacumulación de Cd en cascaras de cacao según los tres distritos de estudio.	21
Figura 6. Bioacumulación de Cd en raíz de cacao según los tres distritos de estudio.	22
Figura 7. Bioacumulación de Cd en semillas de cacao según los tres distritos de estudio.	22
Figura 8. Concentración de Cadmio en semillas de Cacao de los 12 clones evaluados en el presente estudio.	24
Figura 9. Clúster jerárquico entre las localidades mediante el agrupamiento de Ward según las concentraciones de Cd de las partes vegetativas de Cacao	25
Figura 10. Concentración de cadmio en suelos en tres distritos de Madre de Dios.....	27
Figura 11. Gráfico de dispersión y líneas de regresión ajustados para el nivel de cadmio a profundidad de 0 a 30 cm del suelo.....	30
Figura 12. Gráfico de dispersión y líneas de regresión ajustados de nivel de cadmio a profundidad de 30 a 60 cm del suelo según el nivel de cadmio de las partes vegetativas.....	31
Figura 13. Gráfico de dispersión y líneas de regresión ajustados de nivel de cadmio a profundidad de 60 a 90 cm del suelo según el nivel de cadmio de las partes vegetativas.....	31
Figura 14. Muestreo de órganos vegetativos del cacao.....	46
Figura 15. Muestreo de suelos a diferentes profundidades.	46
Figura 16. Preparación de muestras para análisis de cadmio.	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	3
Tabla 2. Estadística descriptiva de concentración de cd en semillas de cacao según los distritos de estudio.....	23
Tabla 3. Valores promedios de las variables de concentración de Cd de las partes vegetativas de cacao por grupos de localidades.	26
Tabla 4. Estadística descriptiva de concentración de cadmio en suelos en los tres distritos de estudio.	29

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

El cacao es materia prima para la elaboración de chocolate y es muy apreciado en todo el mundo. La preocupación actual de los productores de cacao son las regulaciones del mercado internacional sobre el contenido de cadmio en el chocolate y productos de cacao. La Unión Europea estableció los límites máximos de cadmio en productos específicos de cacao y chocolate que van desde 0,10 hasta 0,80 mg/kg, que entró en vigor el 1 de enero del 2019 (Diario Oficial de la Unión Europea 2014). El cadmio ingresa al cuerpo humano generalmente por los alimentos de origen vegetal como el cacao, este metal se acumula en el cuerpo humano y en cantidades que superan las concentraciones recomendadas pueden causar insuficiencia renal y representa un alto riesgo de contraer cáncer (EFSA 2012).

Existen diferentes investigaciones sobre los niveles de cadmio en las semillas de cacao, como también niveles de cadmio presente en el suelo de las parcelas de cacao y su posible influencia sobre los niveles de cadmio en el cacao, estos reportes son de otros países y/o otras regiones peruanas. En suelos del sur ecuatoriano se tuvo un promedio de 1,54 ppm de cadmio en suelos superficiales y 0,85 ppm de cadmio en suelos subterráneos (Chavez et al. 2015), en general los niveles de Cadmio en los suelos varía de 0,01 a 1 mg/kg, en suelos no contaminados la media mundial de cadmio es de 0,36 mg/kg (Kubier, Wilkin y Pichler 2019), por otro lado, suelos geológicamente jóvenes de América Latina en un rango entre 0,22 y 10,80 mg/kg, las concentraciones más altas posiblemente se encuentren en las rocas sedimentarias (Vanderschueren et al. 2021), los niveles de cadmio en el suelo posiblemente sea un factor importante para la absorción de cadmio por el cacao. Siendo Madre de Dios productor de cacao existe la necesidad de

conocer la cantidad de cadmio presente en las diferentes partes del cacao y también en los suelos de parcelas de cacao.

1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son los niveles de cadmio de cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar los niveles de cadmio en sistemas agroforestales con cacao en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la bioacumulación de cadmio en las diferentes partes vegetativas del cacao (raíz, hoja, semilla y cáscara) establecido en sistemas agroforestales en tres distritos de Tambopata en la región Madre de Dios.
- Evaluar los niveles cadmio en los suelos con sistemas agroforestales de cacao en tres distritos de Tambopata en la región Madre de Dios.

1.4. Variables

1.4.1. Variable independiente

- Niveles de cadmio en el suelo

1.4.2. Variables dependientes

- Niveles de cadmio en el cacao

1.5. Operacionalización de variables

En la tabla 1, se detalla la operacionalización de variables para el presente estudio.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable	Indicador	Índice
Variable independiente		
Niveles de cadmio en el suelo	-Número de parcelas -Profundidad del suelo (0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm)	mg/kg
Variable dependiente		
Contenido de cadmio en cacao.	Contenido de cadmio en la raíz	mg/kg
	Contenido de cadmio en la hoja	mg/kg
	Contenido de cadmio en la cascara	mg/kg
	Contenido de cadmio en la semilla	mg/kg

1.6. Hipótesis

H0: Los niveles de cadmio en el suelo no influye en los niveles de cadmio en el cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios.

H1: Los niveles de cadmio en el suelo influye en los niveles de cadmio en el cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios.

1.7. Justificación

La producción de cacao en Madre de Dios cada año va en aumento, en el 2021 fue de 1512,09 toneladas (MINAGRI 2022). Se espera que sea una de las regiones con mayor producción de cacao a nivel nacional, para lograr este

objetivo se están implementando diferentes acciones por parte de las instituciones competentes. Una preocupación constante de los productores de cacao es la presencia de cadmio en los granos de cacao y los productos derivados de este.

El cadmio puede causar problemas de salud, cuando se tienen cantidades mayores de los niveles recomendados. Puede causar insuficiencia renal y representa un alto riesgo de contraer cáncer (EFSA 2012). El cadmio puede llegar al ser humano a través de los productos de cacao como el chocolate y/o algún producto específico a partir del cacao. En ese sentido existe mucha preocupación por la capacidad de adsorción de cadmio por las plantas de cacao. Existen diferentes factores que pueden influir en la disponibilidad del cadmio, tenemos el pH, la materia orgánica, metales competidores como el zinc, y la textura del suelo, además del contenido total de cadmio del suelo (Gramlich et al. 2017).

La concentración de cadmio en los cultivos depende de la disponibilidad de cadmio en el suelo, esto aumenta cuando la concentración de cadmio total aumenta en el suelo. La concentración de cadmio en las parcelas productoras de cacao varía en todo el mundo, sin embargo, tiende a ser más elevada en los suelos geológicamente jóvenes de América Latina con un rango entre 0,22 y 10,80 mg/kg, las concentraciones más altas posiblemente se encuentren en las rocas sedimentarias (Vanderschueren et al. 2021). La concentración de cadmio fue mayor en la parte superior del suelo (0 -10 cm) que en las muestras del subsuelo (10-25 cm), por otro lado, no se encontró diferencia en la concentración de cadmio entre los sistemas de producción (Gramlich et al. 2017). Existe la necesidad de conocer la concentración de cadmio en el suelo, en las partes de cacao y los posibles efectos de los árboles en las parcelas de cacao sobre absorción de cadmio por el cacao.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Gramlich et al. (2018), realizaron un estudio para identificar los factores que rigen la absorción de cadmio por el cacao, realizaron el estudio en 55 fincas en Honduras, en todos ellos determinaron la concentración de cadmio en las hojas, cascara y las semillas de cacao, adicionalmente la relación que tiene con la variedad de factores del suelo y del lugar. Como resultado reportaron los promedios de $2,60 \pm 0,40$ mg/kg y $1,10 \pm 0,20$ mg/kg de cadmio en las hojas de cacao y las semillas de cacao respectivamente, superando los límites máximos fijados por la Unión Europea. Encontrando diferencia significativa en el contenido de cadmio entre los sustratos geológicos.

Chavez et al. (2015), realizaron un estudio sobre los “niveles de cadmio en granos de cacao y su relación con el cadmio del suelo en el sur de Ecuador”. La concentración de cacao disminuyó en el orden granos > cáscara > hojas, reportando un promedio de 0,94 mg/kg de cadmio en las semillas de cacao, excediendo la mayor parte de los lugares estudiados al nivel crítico. Respecto al suelo reportaron que en todos los sitios de muestra el nivel de cadmio superaba al nivel crítico para suelos agrícolas, lo que indica que existe contaminación del suelo por cadmio.

Zug et al. (2019), realizaron un estudio sobre “la acumulación de Cadmio en Cacao Peruano (*Theobroma cacao* L.) y oportunidades para Mitigación”. Ellos reportaron una concentración promedio de cadmio de 2,46 mg/kg, de un rango de 0,20 a 12,56 mg/kg. El contenido de Cd en el suelo fue el impulsor más relevante de la concentración de cadmio en el cacao, así como el uso de fertilizantes.

Gramlich et al. (2017), realizaron un estudio donde investigaron la influencia de distintos sistemas de producción en la absorción de Cadmio por parte del

cacao, en monocultivos y sistemas agroforestal, bajo manejo orgánico y convencional. Se informó que los factores de manejo, el suelo y la planta explicaron solo una pequeña parte de la variación del cadmio en el grano y la cáscara de vaina. Además, los cultivares y los sistemas de producción por sí solos no tuvieron un impacto significativo en los niveles de cadmio en la hoja. Sin embargo, encontraron contenidos de cadmio en hojas más bajos en sistemas agroforestales que en monocultivos. Explicaron que las concentraciones más bajas de Cd en las hojas en los sistemas agroforestales de deben por la competencia por la absorción de cadmio con otras plantas.

Engbersen et al. (2019), estudiaron diferentes cultivares de cacao en el norte de Honduras con la finalidad de observar diferencias entre 11 cultivares en la absorción y translocación de cadmio. Los resultados reportados indican que las concentraciones de cadmio disponible en el suelo se correlacionaron más estrechamente con las concentraciones de cadmio de los portainjertos, vástagos y hojas sin diferencias significativas entre los cultivares, menor correlación de cadmio disponible en el suelo con cadmio en el grano (semilla), para este caso variación significativa entre los cultivares. Tres cultivares, que se analizaron con más detalle, mostraron diferencias significativas en las concentraciones de cadmio de semillas maduros, pero no de las semillas inmaduras, estas diferencias posiblemente sea las diferencias específicas del cultivar en la transferencia de cadmio del xilema al floema.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El cacao (*Theobroma cacao L.*)

El Cacao, *Theobroma cacao L.* es un pequeño árbol tiene su origen en la cuenca del Amazonas. En la actualidad el cacao se cultiva en condiciones trópicos húmedos, como un cultivo básico o acompañado de otras especies formando un sistema agroforestal (Maximova, Lock y Guiltinan 2008), aunque todavía no se llega a consenso sobre el origen del cacao (Motamayor et al. 2002).

En cuanto a la producción mundial para la temporada 2019/2020 se registró 4 728 millones de toneladas, mientras que para la temporada 2020/2021 se estimó 5 024 millones de toneladas (ICCO 2021), con respecto a la

participación en la producción mundial, los países de África Occidental: Nigeria, Costa de Marfil, Camerún y Ghana, representan alrededor del 70 % de la producción mundial (Shahbandeh 2021), mientras que los países de Asia/Oceanía: Papua Nueva Guinea, Malasia, Indonesia y países de América: Colombia, Brasil, Ecuador representan el 17 y 15 % respectivamente. Entre el 80 y 90 % de producción mundial provienen de pequeñas parcelas familiares, entre 5 a 6 millones de productores de cacao (Beg et al. 2017).

La producción en el Perú en el 2019 fue de 141 800 toneladas y en el 2020 se incrementó un 8,8 % legando a una producción récord de 160289 toneladas, teniendo entre los principales productores de cacao a San Martín (43 %), Junín (17 %), Ucayali (14 %), Huánuco (9 %) y Cusco (5 %), representando estos al 87 % de la producción total del país. El 90 % del cacao es exportado principalmente a Europa y Estados Unidos (GESTIÓN 2021). En Madre de Dios la producción de cacao en el 2021 fue de 1 512,09 toneladas (MINAGRI 2022). La producción de cacao en el Perú y en el departamento de Madre de Dios va en aumento cada año, esto según reportes de las diferentes instituciones.

El chocolate es el principal producto del cacao, también es utilizado en las industrias de bebidas finas, cosméticos, jugos y helados. Se obtiene un chocolate con mejores características (menos amargo y más aromática) a partir de la variedad criollo, seguido del trinitario, estas dos variedades están en la categoría fino de aroma, por su parte el forastero como cacao regular (de Souza et al. 2018).

Desde aproximadamente más de 3 000 años hasta nuestros días, el cacao se ha utilizado para tratar diferentes condiciones, algunos de ellos son: anemia, fatiga mental, tuberculosis, fiebre, los cálculos renales e incluso la falta de apetito sexual, además, es considera en el uso para mejorar la función cardiaca, estimación del sistema nervioso, mejora la digestión y mejora la función renal, entre otros beneficios (Kim, Lee y Lee 2011). El extracto de semilla de Theobroma Cacao tiene propiedades antioxidantes muy potente contra los radicales libres, tiene una actividad antitumoral potente, podría usarse para la formulación de bebidas con propiedades preventivas y

terapéuticas contra desarrollo del cáncer, aunque todavía se necesita seguir realizando más estudios (Ebuehi et al. 2019). Las semillas de cacao tienen numerosos fitoquímicos, en mayor proporción los polifenoles y estos están relacionados con diversas propiedades biológicas, como antioxidantes, antiproliferativas, antiapoptóticas, antiinflamatorias y anticancerígenas (Cinar et al. 2021).

2.2.2. Aspectos Botánicos

El cacao tiene gran relevancia económica en el mundo y es la materia prima para la industria chocolatera. Se clasifica como una Magnoliopsida, un orden Malvales, una familia Malvaceae, un género Theobroma y una especie Cacao, existen 22 especies que pertenecen a este género, siendo Theobroma Cacao L. el más importante comercialmente por el valor de sus semillas (de Souza et al. 2018).

Tradicionalmente se conoce tres clases de cacao: Forastero, Criollo y Trinitario, esta clasificación es según los rasgos morfológicos del fruto y de la semilla. Forastero es el término que se usó para describir el cacao introducido a Venezuela desde Trinidad, posteriormente se usó este término para distinguir los cacaos de Ecuador, Brasil e introducidos a África Occidental, siendo estos resistentes y robustos. Las semillas son de tamaño pequeño y aplanadas, los cotiledones son de color púrpura y un fuerte sabor a cacao (Phillips-Mora y Bekele 2019), los frutos son de forma ovoide, superficie lisa, imperceptiblemente arrugada, cuando son inmaduros son verdes, cuando maduran son amarillos (de Souza et al. 2018).

El cacao criollo actualmente se cultiva en México, en América central y América del Sur, los frutos son grandes de superficie arrugada, delgada o gruesa, de color roja o verde, las semillas son grandes y de color blanco o violeta pálida. El cacao criollo auténtico son susceptibles a las enfermedades y son raros en el mundo, por su parte, el cacao criollo híbrido es más común, esta variedad es de sabor medio que produce la mejor calidad de cacao (Beg et al. 2017 ; Phillips-Mora y Bekele 2019).

El cacao trinitario es la combinación de las variedades Criollo y Forastero (Beg et al. 2017), los híbridos entre el cacao Criollo y Forastero se encuentran en el Caribe, América del Sur y Central, Papúa Nueva Guinea, y en cualquier lugar donde se dio en cruce del cacao Criollo y Forastero, es un grupo con mucha diversidad fenotípica y genética (Phillips-Mora y Bekele 2019).

De Souza et al. (2018), describe una planta de cacao de la siguiente manera:

Altura: los árboles de cacao pueden alcanzar de 5 a 8 m de altura, con un diámetro de 4 a 6 m de diámetro de copa. Esta altura está sujeto a las condiciones del medio, por ejemplo, en el bosque puede alcanzar hasta 20 m por competencia de luz.

Sistema radicular: la raíz es pivotante, la profundidad y forma dependerá de la estructura, textura y consistencia del suelo. Generalmente la mayor parte (70 a 90 %) las raíces secundarias están captando los nutrientes en los primeros 30 cm del suelo.

Tallo: es erecto, en los primeros años es liso y con el pasar del tiempo este va adquiriendo un tallo más áspero y rugoso. Aproximadamente a los 2 años de desarrollan las orquetas para formar la copa, estas están compuestas por ramas laterales y secundarias.

Hojas: las hojas son oblongas, acuminadas y glabras con nervadura central prominente. Las hojas nuevas son de color verde, alguno más o menos rosadas, algunas tienden a violeta, esto según el cultivar.

Flores: estas aparecen a partir de yemas de las axilas de hojas viejas, en los cojines florales en el tallo o ramas leñosos. Las flores hermafroditas están formadas por cinco sépalos, cinco pétalos, cinco estaminodios, cinco estambres y un pistilo con un ovario que contiene cinco óvulos. La polinización es exclusivamente por insectos, principalmente por la familia Ceratopogonidae, género Forcipomya.

Fruto: consta de un pericarpio compuesto de un epicarpio carnoso y grueso, el mesocarpio que es poco lignificado, fino y duro y el endocarpio que es carnoso y poco grueso. El fruto cuando es inmaduro podemos encontrar

desde color verde y va madurando a amarillo, otros cultivares de color púrpura va madurando a color naranja. Generalmente desde la polinización hasta la madurez pasa un tiempo promedio de 167 días.

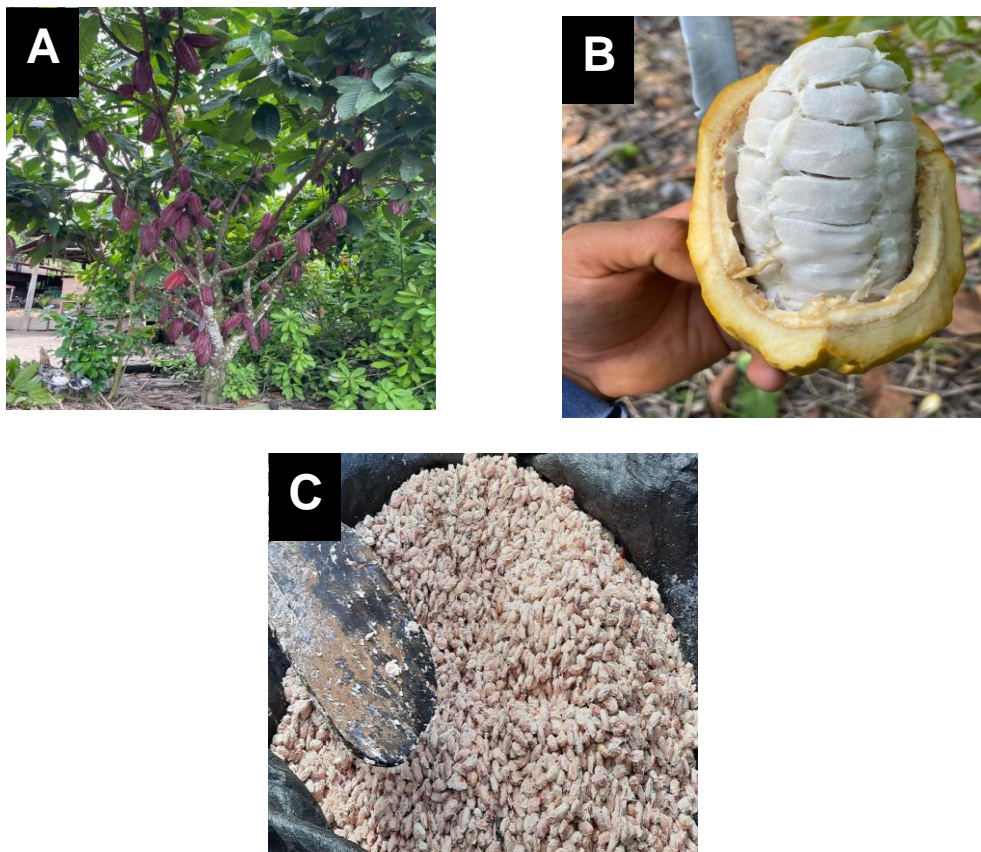


Figura 1. Árbol, vaina y semilla de cacao. (A) Árbol de cacao; (B) Granos de cacao expuestos la pulpa mucilaginosa blanca que la rodea dentro de la mazorca de cacao; (C) Semilla de cacao.

Semilla: está cubierto de una pulpa mucilaginosa con un sabor ácido – dulce, la semilla tiene una forma elipsoide a ovoide con 2 a 3 cm de longitud. El embrión tiene dos cotiledones con colores según los cultivares, desde verde hasta violeta.

2.2.3. Seguridad alimentaria metales pesados

Varios elementos que no son beneficiosos para los seres humanos, ni para las plantas, se pueden encontrar en el medio ambiente y estos pueden estar biodisponibles, estos pueden ser tóxicos en muy bajas concentraciones, la presencia de estos elementos en el medio ambiente de las plantas específicamente en el suelo se debe principalmente de un origen

antropogénico y también puede ser por procesos geológicos. Las actividades como la minería, la fundición de metales y la fabricación de productos que en su composición contiene metales son las principales fuentes que liberan metales al medio ambiente, y la otra fuente de liberación es la aplicación de productos agrícolas, al respecto el cadmio se ha agregado como impurezas en los fertilizantes de fosfato (Clemens 2019).

Entre los metales no esenciales y tóxicos que se encuentran en el suelo tenemos el arsénico (As), el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el mercurio (Hg), estos elementos son una preocupación constante para la seguridad alimentaria y la salud humana, por la exposición constante a estos elementos a través de los alimentos, agua y el polvo, al respecto > 90 % de la exposición total de la población no fumadora tienen como fuente principal de cadmio a los alimentos (Zhao et al. 2022).

El consumo de alimentos contaminados con metales tóxicos causa graves problemas en la salud, entre ellos podemos mencionar el cáncer gastrointestinal, baja el sistema inmunológico, retrasa del crecimiento mental y desnutrición. Entre estos metales el Pb y Cd, pueden provocar el cáncer, fracturas y malformaciones óseas, problemas cardiovasculares, disfunción renal, hipertensión, entre otros problemas graves del hígado, también enfermedades en los pulmones, sistema nervioso y el sistema inmunitario (Rai et al. 2019). El Cd y As son carcinógenos de clase I, el primero está relacionado con el cáncer de pulmón y el segundo con el cáncer a pulmón, piel y vejiga. El mecanismo de acción de los metales pesados son la interacción con los grupos funcionales de las proteínas y las interferencias con la homeostasis de los elementos esenciales. En el caso de Cd y As, daña enzimas reparadoras del ADN, por otro lado, el Cd reemplaza al Zn en proteínas que requieren de este micronutriente como cofactor (Clemens 2019).

2.2.4. Absorción de metales tóxicos en cultivos

El arsénico, cadmio, plomo y el mercurio, son metales tóxicos que están presentes casi en todas partes en el medio ambiente, teniendo como origen

antropogénicas. Una de las maneras que estos elementos llegan al ser humano es a través de la ingesta de alimentos derivados de plantas. Los metales tóxicos son absorbidos y transportados por las mismas vías de los elementos esenciales (Clemens y Ma 2016).

Los metales tóxicos y los nutrientes tienen características fisicoquímicas similares, debido a esto, los metales tóxicos son absorbidos a través de las células de la raíz y estos son transportados a los diferentes tejidos vegetales a través de transportadores de membrana, por otro lado, la similitud de estos elementos puede limitar la discriminación a las proteínas para diferenciar entre metales tóxicos y nutrientes (Zhao et al. 2022). Entre las posibles rutas de captación de cadmio se tiene las ZIP (transportador regulado por Zinc / proteína similar a un transportador regulado por hierro), canales de calcio y también los canales de cationes no selectivos). Otra ruta para captación de cadmio es a través de transportadores de Fe, al respecto existen reportes de investigaciones donde se apreció mayor absorción de cadmio en condiciones de deficiencia de Fe (Clemens 2019). La absorción de cadmio en el arroz se da por la raíz a través de los transportadores OsNRAMP5 de Mn y en menor proporción por el transportador de Mn OsNRMP1, mientras que en Arabidopsis los transportadores de Fe(II) IRT1 y el transportador de Mn NRAMP1 transportan y ayudan en la absorción de Cd (Zhao et al. 2022).

2.2.5. Contenido de cadmio en suelo y en el cacao

El contenido de Cadmio en los suelos varía de 0,01 a 1 mg/kg, en suelos no contaminados. La media mundial de cadmio es de 0,36 mg/kg, es de entender que los valores varían entre continentes, países y tipos de suelo. La presencia elevada de este metal en el suelo está asociada con la abundancia de minerales arcillosos, carbonatos, materia orgánica y óxidos hidratados, y ciertas características fisicoquímicas como el pH elevado y/o condiciones anóxicas. La contaminación antropogénica de cadmio en el suelo y las aguas subterráneas son a través de emisiones de combustión, vertederos, tráfico, industria metalúrgica, minería entre otros, así como también el uso de fertilizantes de fosfato, que en composición contiene cadmio como impureza, aumentado el contenido en los suelos. Se cree que un suelo contaminado por

cadmio está por encima de 3 ppm (Kubier, Wilkin y Pichler 2019). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) estableció que 0,43 mg/kg es un nivel crítico de cadmio total en suelos agrícola (USEPA 2002, citado por Chavez et al. 2015). En Perú según el DS N° 011-2017, el límite máximo para valores de cadmio en suelos agrícolas es de 1,4 mg/kg (MINAM 2017).

El cadmio llega al cuerdo humado a través de la alimentación, siendo este uno de los principales medios de exposición para la población no fumadora. El cadmio está relacionado con un alto riesgo de cáncer, también puede causar insuficiencia renal. La EFSA estableció una ingesta semanal de 2,5 g/kg de peso corporal, mientras que el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios estableció una ingesta mensual de 25 g/kg de peso corporal (EFSA 2012).

La regulación del contenido de Cadmio en el cacao y sus subproductos es una preocupación latente para los productores de Sudamérica. La Unión Europea estableció los límites máximos de cadmio en productos específicos de cacao y chocolate que van desde 0,10 hasta 0,80 mg/kg, que entró en vigor el 1 de enero del 2019 (Diario Oficial de la Unión Europea 2014). Para los granos de cacao se ha utilizado como umbral a 0,8 mg/kg, para la elaboración de productos de cacao que puedan estar dentro de los límites aceptables de cadmio de la Unión Europea (Argüello et al. 2019 ; Chavez et al. 2015).

La concentración promedio de cadmio en las semillas de cacao de Honduras fueron 1,1 mg/kg, por debajo del promedio en las hojas (Gramlich et al. 2018), en las semillas de cacao ecuatoriano la concentración promedio de cadmio fue de 0,90 mg/kg (Argüello et al. 2019) y 0,94 mg/kg (Chavez et al. 2015), en el cacao peruano la concentración promedio fue de 2,46 mg/kg (Zug et al. 2019), en todos los casos supera el límite máximo antes mencionado. La concentración de cadmio en las semillas aumenta conforme aumenta la concentración de cadmio en el suelo y con la disminución de pH del suelo (Argüello et al. 2019), además el uso de fertilizantes elevó la concentración de cadmio significativamente en el cacao (Zug et al. 2019).

2.2.6. Límites máximos de Cadmio

La Unión europea (UE) estableció límites máximos tolerables de concentraciones de Cadmio para el cacao, indicando un valor entre 0,6 y 0,8 mg/kg. Sin embargo, este valor fue determinado para productos procesados de cacao. Al no haber un valor para productos sin procesar de cacao, muchos autores han usado esta clasificación para sus comparaciones (Rofner 2021).

A consecuencia de que la UE propuso los límites de cd en cacao para productos procesados, Meter, Atkinson y Labiberte (2019) propusieron un nivel tolerable de cadmio en cacao sin procesar. Este valor es de 1,14 mg/kg, mientras que Rofner (2021) propuso un valor de 1,22 mg/kg.

Para la concentración de cadmio en suelos se han determinado límites máximos de:

- Según la United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2002) estableció un nivel crítico de 0,43 mg/kg.
- Sin embargo en Brasil, establecieron un limite critico de 0,5 mg/kg (Fadigas et al. 2006).
- Mientras que para Tóth et al. (2016) establecieron un umbral superior a 1 mg/kg de Cd total.
- Para Luis-Alaya et al. 2023 y Gamboa (2019) los limites de Cd para suelos es $\geq 1,4$ mg/kg.
- Para Perú el limite maximo permitido es de 0,40 mg/kg (MINAM 2013).

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de estudio

El presente estudio es explicativo, porque describe la relación entre dos variables (variable independiente niveles de cadmio en el suelo y la variable dependiente niveles de cadmio en partes vegetativas cacao).

3.2. Diseño del estudio

El presente estudio se ajusta un diseño no experimental, lo que se hizo en la investigación fue observar un fenómeno tal como se dan en su contexto natural, para luego analizarlo.

3.3. Lugar de ejecución

El presente estudio se desarrolló en parcelas agrícolas del departamento de Madre de Dios, provincia Tambopata, en los distritos de Laberinto, Inambari y Tambopata. La Figura 2 muestra la ubicación de las áreas que se estudiaron.

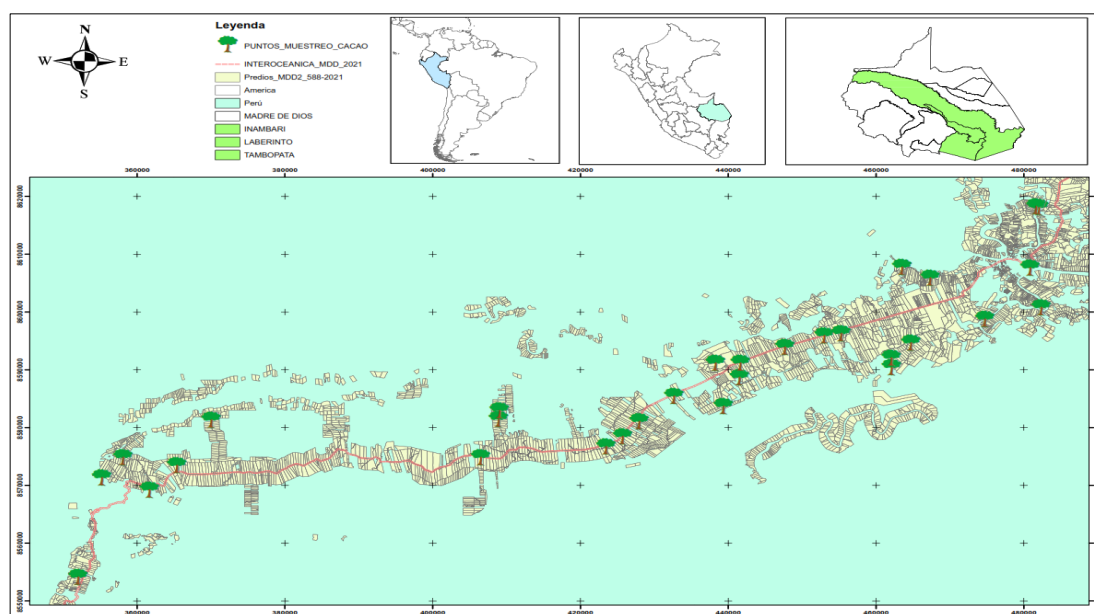


Figura 2. Mapa de ubicación de áreas a estudiar.

Las muestras de suelo y cacao fueron obtenidas de cada parcela seleccionada georreferenciado. Las muestras recolectadas fueron enviadas al laboratorio de agua, suelos y medio ambiente y fertirriego de la Universidad Nacional Agraria La Molina para su análisis de contenido de cadmio. Las fechas de evaluación fueron programados tomando en cuenta algunos factores como disponibilidad económica, contacto con el laboratorio entre otros.

3.4. Población y muestra

La población está representada por todas las parcelas con cultivos de cacao que existen en los diferentes distritos a estudiar en la provincia de Tambopata en la región de Madre de Dios. No se encontró una base datos confiable con la cantidad de predios con las áreas de cacao por distrito. No se cuenta con presupuesto para realizar trabajo de campo para obtener la cantidad de predios existentes y sacar la cantidad de muestras representativas.

El tipo de muestreo fue la de no probabilístico y la técnica de muestreo fue por conveniencia. El área de las diferentes parcelas fue de una (01) ha. Las parcelas seleccionadas fueron aquellas que tuvieron sistemas agroforestales con cacao, frutales y especies forestales. Solo se consideraron parcelas con plantaciones de cacao mayores a 5 años. El tamaño de la muestra total fue de 30 parcelas de Sistemas agroforestales con cacao.

3.5. Métodos y técnicas

3.5.1. Materiales, reactivos y equipos

a) Materiales

- Machete
- Barreno
- Bolsas de polietileno
- Baldes
- Tijera de poda
- Guantes quirúrgicos
- Marcador

b) Reactivos

- Agua tratada

c) Equipos

- Balanza de precisión
- Estufa
- GPS

3.5.2. Métodos de análisis

Las muestras se rotularon y fueron enviados al laboratorio de Universidad Nacional Agraria La Molina para su análisis de contenido de cadmio, según el método implementado por el laboratorio.

3.5.3. Metodología experimental

En el siguiente Figura 3, se muestra el diagrama de la metodología que se aplicó para el presente estudio. En la Figura 3, P1 representa a la parcela agrícola 1, P2 a la parcelada agrícola 2 y así sucesivamente hasta la Pn.

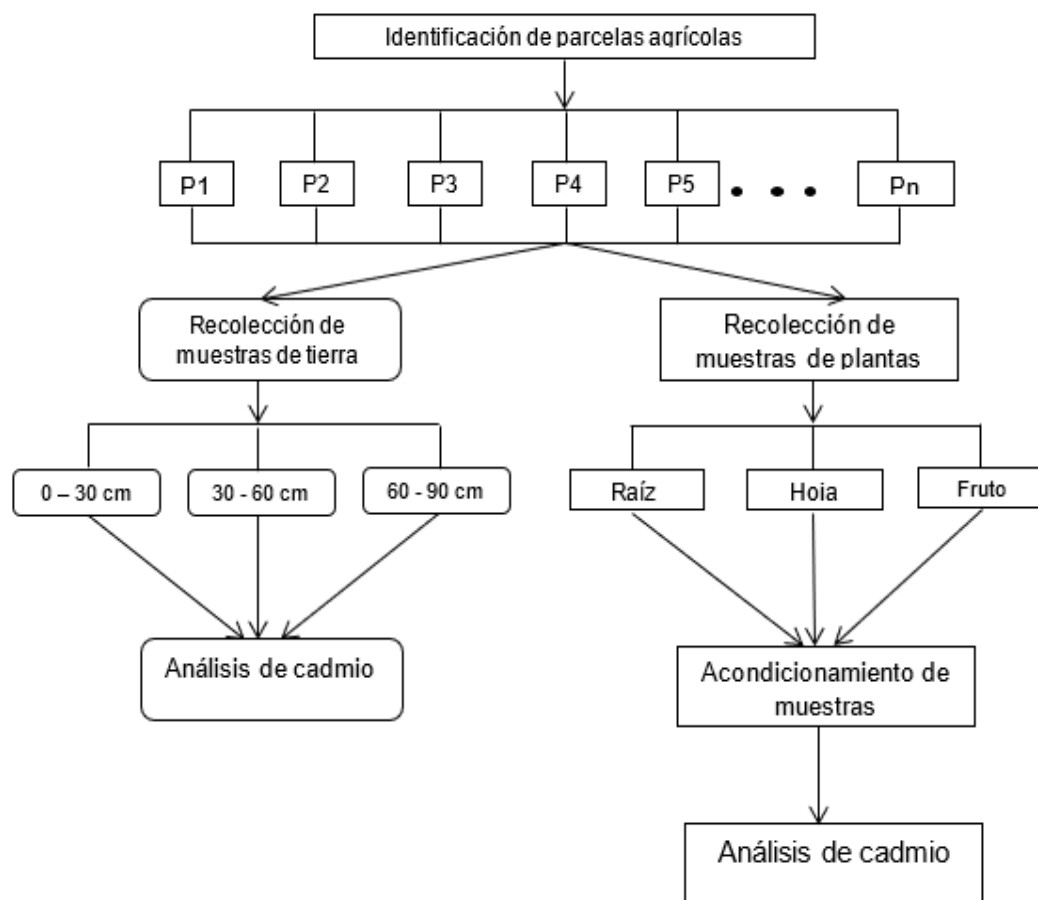


Figura 3. Flujo de estudio.

a) Identificación de parcelas agrícolas

Se identificaron parcelas agrícolas ubicados en los distritos de Inambari, Laberinto y Tambopata, los criterios de selección fueron parcelas con sistemas agroforestales con cacao, cercanas a la carretera interoceánica, la productividad, plantas en producción mayores a 5 años.

b) Recolección de muestras de suelo

La recolección de muestras de suelo se realizaron según la metodología planteada por Chavez et al. (2015) y según las recomendaciones del MINAM (2014). Las muestras de suelo fueron recolectadas en tres niveles de profundidad: 0 – 30, 30 – 60 y 60 – 90 cm. El muestreo se realizó en franjas paralelas. Se recolecto 5 núcleos de suelo a una distancia equidistante de 20 m por franja. En total fueron 10 muestras de suelo por parcela. Para posteriormente conformar una muestra compuesta. Esto se aplicó para cada nivel de profundidad. Las muestras fueron secadas al aire, se molieron y se pasaron por un tamiz de 2 mm aproximadamente. Estas muestras fueron rotuladas y enviadas al laboratorio.

c) Recolección de muestras de plantas

La recolección de muestra planta de cacao (raíz, hoja y fruto) se realizaron según metodología desarrollada por Chavez et al. (2015). Para el caso de las muestras de las diferentes partes (raíz, hoja, fruto) de la planta de cacao, se recolectaron de cuatro plantas de cacao ubicados alrededor de los puntos de muestreo de suelo. En caso de las hojas se recolectaron 4 hojas por planta de cacao en los puntos cardinales de la parte media del cacao, para ello se utilizaron tijeras desinfectadas, en total se recolectaron 40 hojas sin peciolo, las hojas se recolectaron en bolsa de papel Kraft. Se recolectaron 4 mazorcas maduras aleatoriamente de las plantas de alrededor de núcleos de muestreo de suelo y de la misma forma se muestrearon las raíces por cada parcela.

d) Acondicionamiento de muestras

Se siguió la metodología reportada por Chavez et al. (2015). Las hojas recolectadas se lavaron con agua tratada, se secaron en una estufa a 70 °C por 48 h. Las semillas se separaron de la cascara, estos se secaron en una estufa a 70 °C por 48 h, estos fueron rotulados y enviados al laboratorio para su análisis.

3.6. Tratamiento de los datos

Se realizó análisis descriptivo (Medidas de tendencia central y de dispersión) para resumir valores de concentraciones de cadmio para los tres distritos.

Para comparar las concentraciones de cadmio de los órganos vegetativos y suelos en cacao para los tres distritos de estudio se utilizaron métodos paramétricos (ANOVA) y no paramétricos (Kruskal-wallis) a un nivel de significancia del 5%. Para las comparaciones múltiples se usó la prueba de Dunn's para el caso de suelo, puesto que fue el único que presentó significancia estadística (Kruskal-wallis) con un nivel de significancia del 5%.

Se realizaron regresiones no lineales para modelar la relación de cadmio en suelos y los órganos vegetativos del cacao. Para ello se utilizó el R^2 como criterio de ajuste. Asimismo, se utilizó la técnica multivariada de clúster o dendograma jerárquico mediante la Prueba SIMPROF (prueba de permutación de perfiles de similaridad) con la finalidad de observar agrupamientos de las localidades de estudio. Los análisis fueron realizados mediante el software R 4.03 y Sigmaplot 14.5. Del mismo modo los gráficos en caso de R fueron realizados mediante el paquete GGLOT 2 y software Sigmaplot.

CAPITULO IV. RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

4.1. Bioacumulación de cadmio en partes vegetativas del cacao

4.1.1. Bioacumulación en hojas

Los tres distritos de estudio presentaron similar concentración de cadmio en las hojas (ppm) (Kruskal-Wallis; $P > 0,05$), sin embargo, se puede observar que el distrito con mayor concentración de cadmio fue Inambari (Mediana = 1,20) y la menor concentración fue de Laberinto (Mediana = 1,01) (Figura 4).

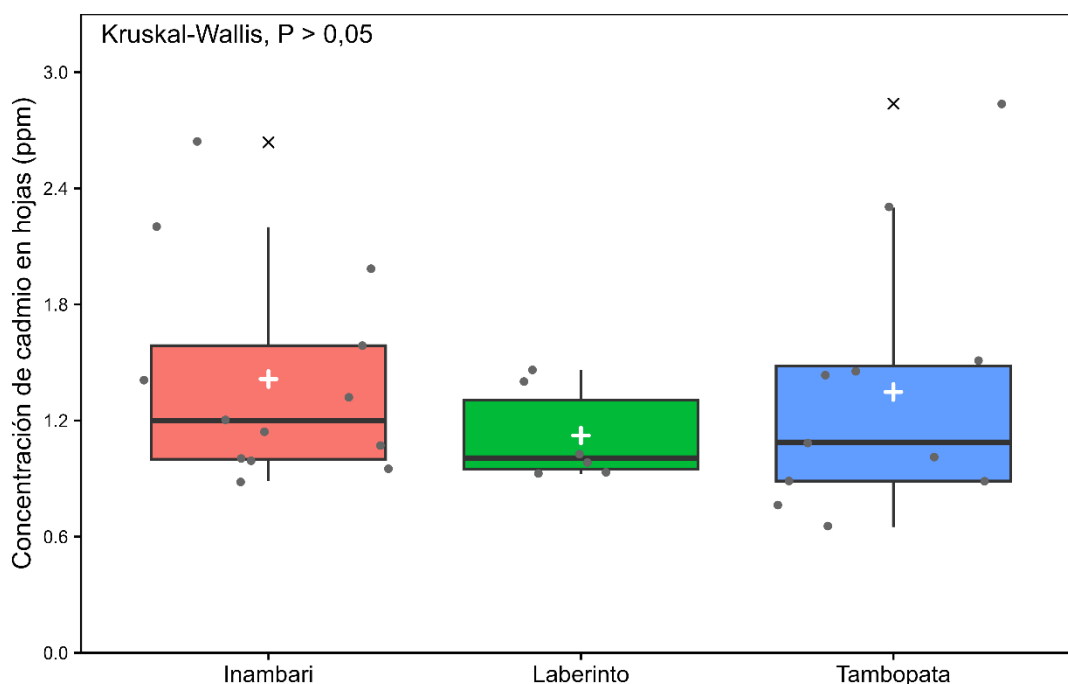


Figura 4. Bioacumulación de Cd en las hojas de cacao según los tres distritos de estudio. El símbolo de cruz blanca representa el promedio.

Estos valores de Cd en las hojas son superiores a los reportados por Mendoza-López et al. (2021). Asimismo, superan el límite máximo permitidos por la OMS de 0,5 ppm. Se encontró mayores valores de concentración de cd

en hojas en comparación con los demás órganos vegetativos. Esto es debido a la capacidad del cadmio de trasladarse y movilizarse a los diversos órganos vegetativos del cacao (Llatance et al. 2018). Mientras que para Gramlich et al. (2018) las concentraciones de Cd en hojas alcanzaron promedios de $2,6 \pm 0,4$ mg/kg siendo superiores a lo reportado en el presente estudio.

4.2.1. Bioacumulación en cascara

Por otra parte, los tres distritos de estudio presentaron similar concentración de cadmio en la cascara. Sin embargo, se puede observar que el distrito con mayor concentración de Cd fue Tambopata (promedio = 0,87) y la de menor concentración fue de Laberinto (promedio = 0,73) (Figura 5).

Estos valores son inferiores a los reportado por Tuesta (2022) quien encontró promedio de $0,90 \pm 0,43$ ppm.

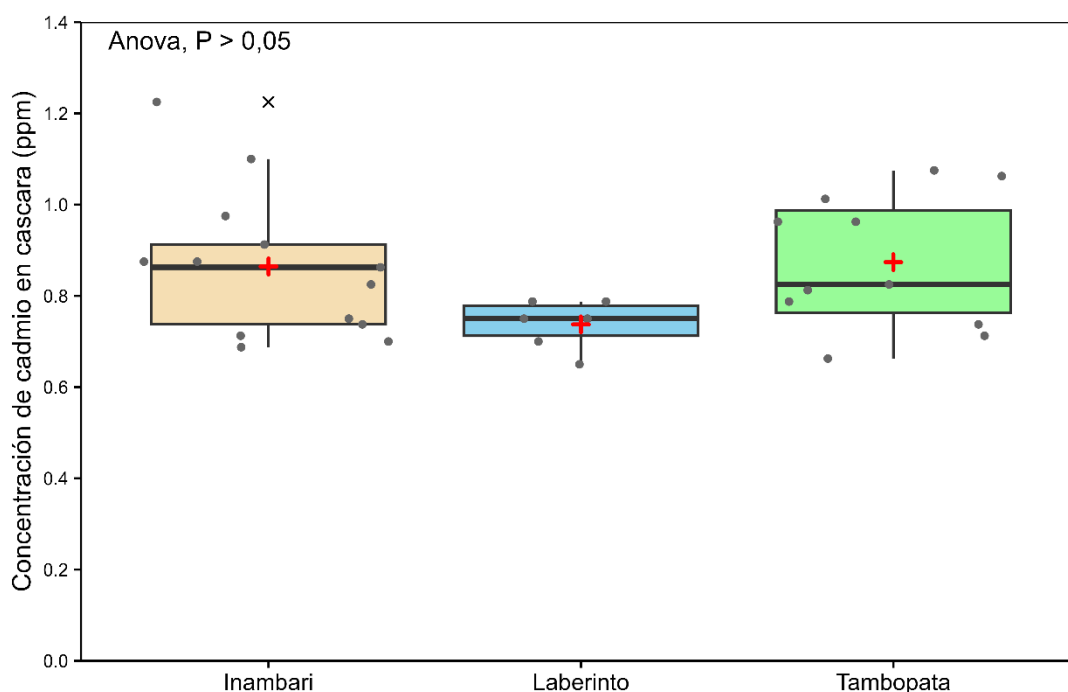


Figura 5. Bioacumulación de Cd en cascara de cacao según los tres distritos de estudio.

4.2.2. Bioacumulación en raíz

El distrito que presentó mayor bioacumulación de cadmio en la raíz fue Tambopata (1,03), sin embargo, fue estadísticamente similar a los demás distritos (Figura 6). Estos valores de Cd en los tres distritos son inferiores a lo reportado por Tuesta (2022) quienes encontraron promedios de $2,12 \pm 1,4$ ppm.

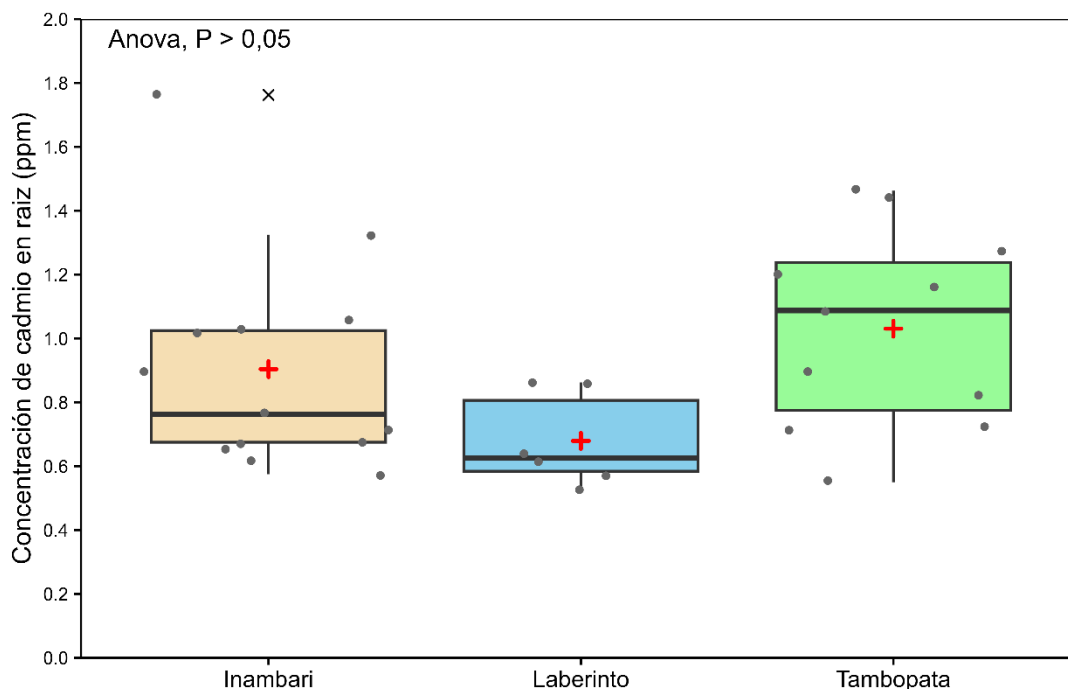


Figura 6. Bioacumulación de Cd en raíz de cacao según los tres distritos de estudio.

4.2.3. Bioacumulación en semillas

No se evidencian diferencias significativas de concentración de cadmio en semillas para los tres distritos de estudio. Sin embargo, se observa una mayor concentración de cadmio en el distrito de Tambopata y una menor concentración en el distrito de Laberinto (Figura 7).

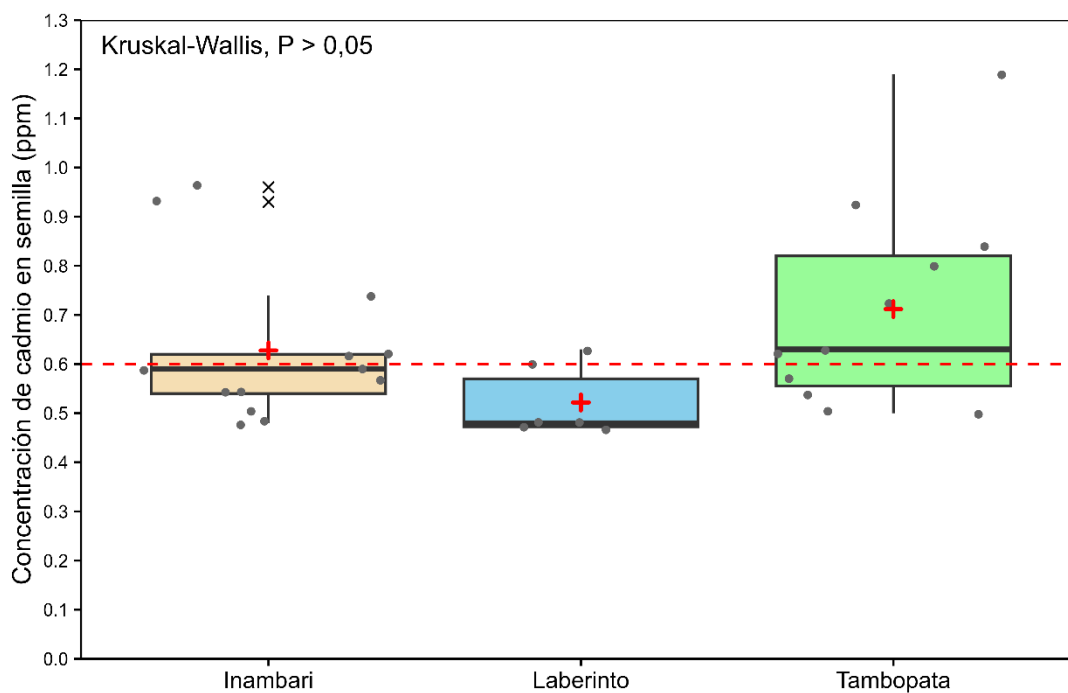


Figura 7. Bioacumulación de Cd en semillas de cacao según los tres distritos de estudio.

El límite máximo permitido en granos crudos fluctúa entre 0,5 a 1,1 ppm para América Latina y el Caribe (Meter, Atkinson y Laliberte 2019). El resultado de concentración de cd promedio para los tres distritos están dentro del rango establecido (Tabla 1). Sin embargo, se registró valores máximos de 1,19 ppm en el distrito de Tambopata. Según Meter, Atkinson y Laliberte (2019) indican que regularmente se superan los límites establecidos en ciertas regiones de América Latina y el Caribe. Mendoza-López et al. (2021) reportaron para la región de San Martín (Lamas) concentraciones de cd promedio de 0,07 ppm, inferiores a lo reportado en el presente estudio (tabla 1), mientras que en Ecuador reportaron valores promedios de 0,90 ppm y los factores principales que influyeron en la concentración de cadmio en las semillas son el suelo, el pH y el porcentaje de orgánico (Argüello et al. 2019). En el Perú la región con menor concentración de cadmio en suelos fueron reportados en Cusco mientras que la mayor concentración se encontró en Tumbes (Arévalo-Gardini et al. 2017 ; Argüello et al. 2019).

En Ucayali Lopez y Hoyos (2018) compararon tres tipos de manejos de cultivos de cacao (químico, orgánico y tradicional) a pesar de que se registraron mayores concentraciones de cadmio en el manejo con químicos no se evidenciaron diferencias significativas en los tres tipos de manejo ($P < 0,05$). Sin embargo, estos valores promedios fueron superiores a lo reportado en el presente estudio. Asimismo, se puede observar que el valor máximo registrado en Inambari es superior en comparación de los tres tipos de manejo (Tabla 2).

Tabla 2. Estadística descriptiva de concentración de cd en semillas de cacao según los distritos de estudio.

Distritos	Promedio	SD	Mediana	Mínimo	Máximo
Inambari	0,63	0,16	0,59	0,48	0,96
Laberinto	0,52	0,07	0,48	0,47	0,63
Tambopata	0,71	0,21	0,63	0,5	1,19
Promedio general	0,62	0,15	0,57	0,48	0,93

SD = desviación estándar

4.2. Variación de concentración de cd en clones de Cacao

Para el presente estudio se muestrearon un total de 12 clones de cacao distribuidos en los tres distritos (Laberinto, Tambopata y Inambari). Los clones de Cacao que superaron el límite máximo permitido para la Unión Europea (0,6 mg/kg) fueron CCN51/VRAE99, VRAE99, CCN51/ICS95, CCN51/VRAE15, VRAE15 y CCN51, así mismo el cacao nativo supero estos límites máximos permitidos (Figura 8). De ello el clon con un alto valor de concentración de cadmio en las semillas fue registrado en CCN51/VRAE99 (1,19 ppm).

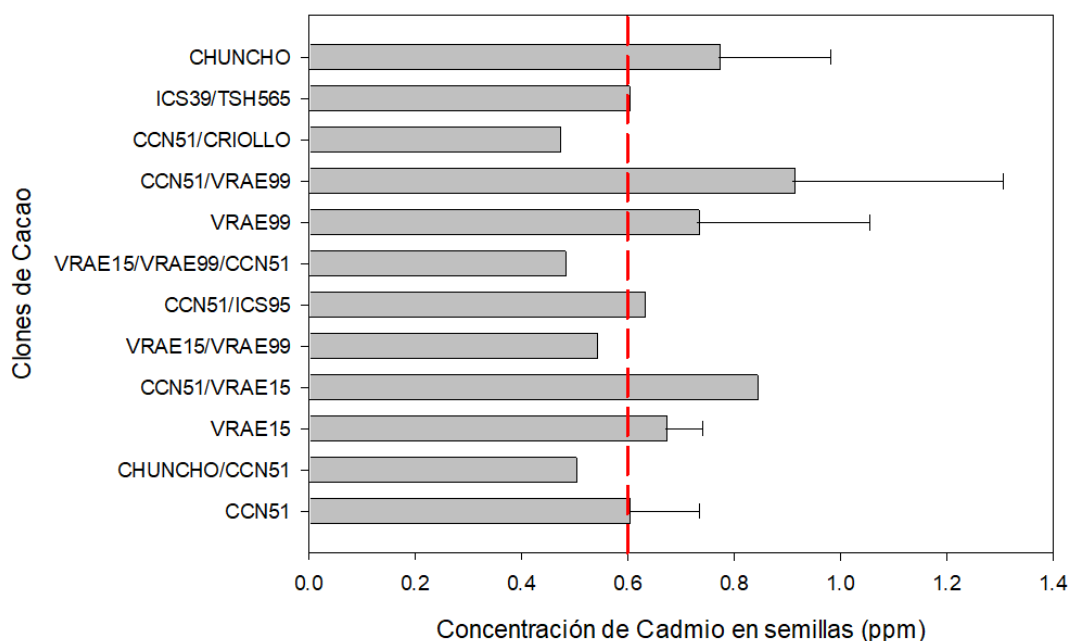


Figura 8. Concentración de Cadmio en semillas de Cacao de los 12 clones evaluados en el presente estudio.

Los clones de cacao que no superaron los límites y tuvieron una menor concentración de cadmio en la semilla fueron CCN51/CRIOLLO, VRAE15/VRAE99/CCN51, CHUNCHO/CCN51.

El valor promedio de CCN51 en el presente estudio fue $0,60 \pm 0,13$ superiores a lo reportado por Tuesta (2022), por un aproximado de 2,24 veces mayor. De igual forma el cacao chuncho fue 2,23 veces mayor que los reportado por Tuesta (2022).

La figura 9, muestra el dendograma generado usando la distancia de enlace de Ward. Las localidades fueron conformadas por 4 grupos según su

similaridad entre ellos y heterogeneidad entre grupos con la finalidad de poder caracterizar localidades con concentraciones de cadmio similares según su concentración en las partes vegetativas del cacao. Los grupos fueron diferenciados por colores.

El grupo I (color rojo): estuvo conformado por las localidades Chonta, Puerto Trujillo, Centromin, Isuyama y Santa rosa. Las localidades con mayor similitud fueron Isuyama con Santa rosa y las variables que más contribuyeron a la similitud fueron la concentración de cd en semillas y cascara (Tabla 3).

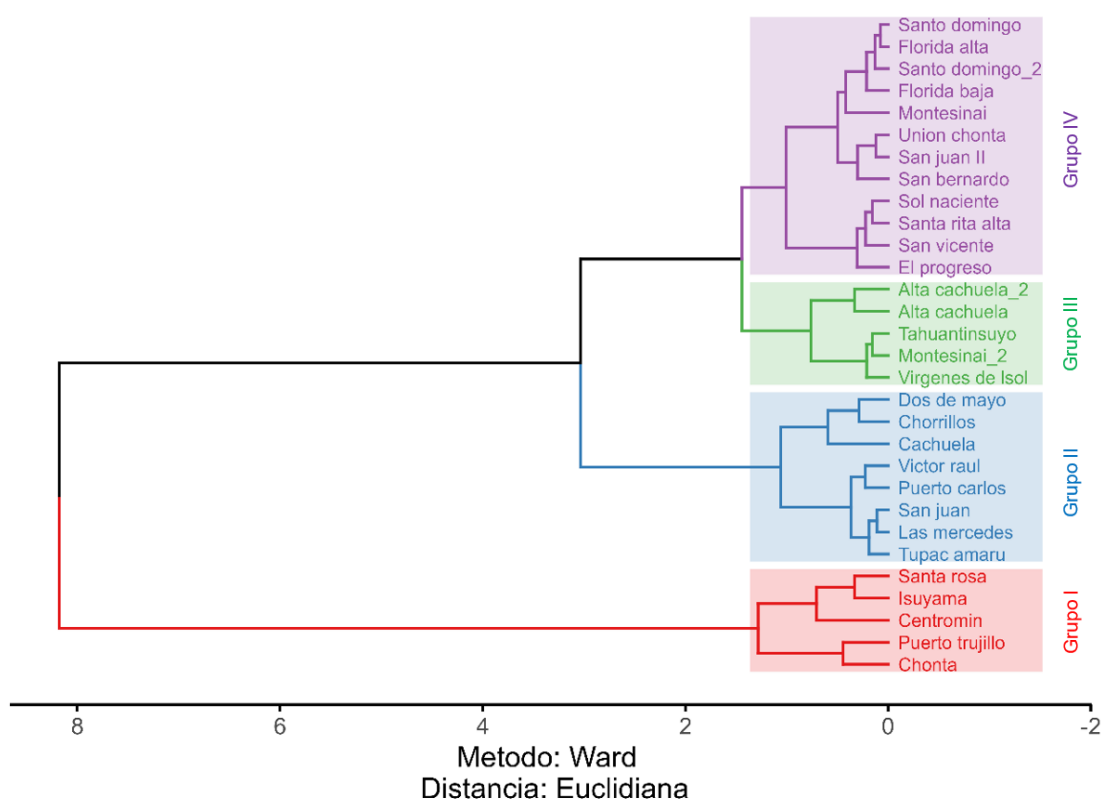


Figura 9. Clúster jerárquico entre las localidades mediante el agrupamiento de Ward según las concentraciones de Cd de las partes vegetativas de Cacao. La agrupación se realizó mediante la prueba SIMPROF (prueba de permutación de perfiles de similitud)

El grupo II (Azul): las localidades que presentaron mayor similitud fueron San Juan – Las mercedes, seguido de Víctor raul – Puerto carlos y por último Dos de mayo – Chorrillos. La concentración de cd en semillas fue la que más caracterizo a las localidades San juan con Las mercedes y Víctor raul con Dos de mayo (Tabla 3).

El grupo III (Verde): las localidades con mayor similitud fueron Tahuantinsuyo y Montesinai_2 que a su vez comparten similitud con Vírgenes del sol.

El grupo IV (Morado): las localidades con mayor similitud fueron Santo domingo con Florida alta y estos a su vez se agruparon con Santo domingo_2. Por otra parte, las localidades que comparten mayor similitud fueron Unión chonta – San juan II, seguido de Sol naciente – Santa rita alta.

Tabla 3. Valores promedios de las variables de concentración de Cd de las partes vegetativas de cacao por grupos de localidades en base a los clúster.

Clúster	Distrito	Localidad	Clon	Suelo (ppm)	Hoja (ppm)	Semilla (ppm)	Cascara (ppm)	Raíz (ppm)
I	Inambari	Puerto trujillo	VRAE99	1,72	2,64	0,96	0,88	1,01
I	Tambopata	Chonta	CCN51/VRAE99	1,39	2,84	1,19	1,06	1,28
I	Inambari	Santa rosa	CCN51	1,66	1,99	0,74	0,83	1,33
I	Tambopata	Isuyama	VRAE15	1,39	2,30	0,72	0,83	1,44
I	Inambari	Centromin	CCN51	1,72	2,20	0,93	1,23	1,76
II	Inambari	San juan	CCN51	1,52	1,41	0,59	0,88	0,90
II	Laberinto	Las mercedes	ICS39/TSH565	1,34	1,46	0,60	0,79	0,86
II	Tambopata	Tupac amaru	CHUNCHO/CCN51	1,07	1,51	0,50	0,74	0,83
II	Inambari	Puerto carlos	CCN51	1,59	1,59	0,59	0,74	0,68
II	Laberinto	Víctor raul	CCN51/CRIOLLO	1,42	1,40	0,47	0,75	0,64
II	Inambari	Dos de mayo	CCN51	1,46	1,33	0,62	0,75	1,06
II	Tambopata	Chorrillos	CCN51/VRAE99	1,15	1,44	0,63	1,01	1,09
II	Tambopata	Cachuela	CHUNCHO	1,32	1,45	0,92	0,96	1,46
III	Laberinto	Tahuantinsuyo	CCN51/ICS95	1,39	0,99	0,63	0,75	0,86
III	Tambopata	Montesinai_2	CCN51	1,37	1,09	0,54	0,81	0,90
III	Inambari	Virgenes del sol	CCN51	1,36	1,00	0,54	0,69	1,03
III	Tambopata	Alta cachuela	CCN51	0,81	1,01	0,80	1,08	1,16
III	Tambopata	Alta cachuela_2	VRAE15	0,89	0,76	0,62	0,96	1,20
IV	Inambari	Santa rita alta	VRAE15/VRAE99	1,35	1,20	0,54	0,98	0,65
IV	Inambari	Sol naciente	VRAE15/VRAE99/ CCN51	1,39	1,14	0,48	0,91	0,76
IV	Inambari	San vicente	CCN51	1,33	1,08	0,57	0,86	0,58
IV	Inambari	El progreso	CCN51	1,13	0,99	0,50	1,10	0,61
IV	Tambopata	Union chonta	CCN51	1,41	0,89	0,57	0,79	0,71
IV	Inambari	San juan II	CHUNCHO	1,23	0,95	0,62	0,70	0,71
IV	Tambopata	San bernardo	CCN51/VRAE15	1,05	0,89	0,84	0,71	0,73
IV	Inambari	Florida alta	CCN51	1,43	0,89	0,48	0,71	0,68
IV	Laberinto	Santo domingo	CCN51	1,33	0,93	0,48	0,70	0,61
IV	Laberinto	Florida baja	VRAE15/VRAE99/ CCN51	1,30	1,03	0,48	0,65	0,53
IV	Laberinto	Santo domingo_2	CCN51	1,32	0,94	0,47	0,79	0,58
IV	Tambopata	Montesinai	VRAE99	0,67	0,65	0,50	0,66	0,55
Promedio general				1,31	1,33	0,64	0,84	0,91
Desviación estándar				0,24	0,55	0,18	0,15	0,32

*Se elaboró con la base de datos del anexo 2. Solo en suelos se promedió las tres profundidades.

Las localidades que superan el umbral generalmente aceptado de 0,60 ppm de cadmio en semillas para la Unión Europea fueron 14 de las 30 localidades (Tabla 3).

4.3. Niveles cadmio en los suelos en sistemas agroforestales con cacao de tres distritos de Tambopata en la región Madre de Dios.

En la figura 10, se observa la comparación de los niveles de cadmio en sistemas agroforestales con cacao de los tres distritos de estudio según la profundidad de muestreo.

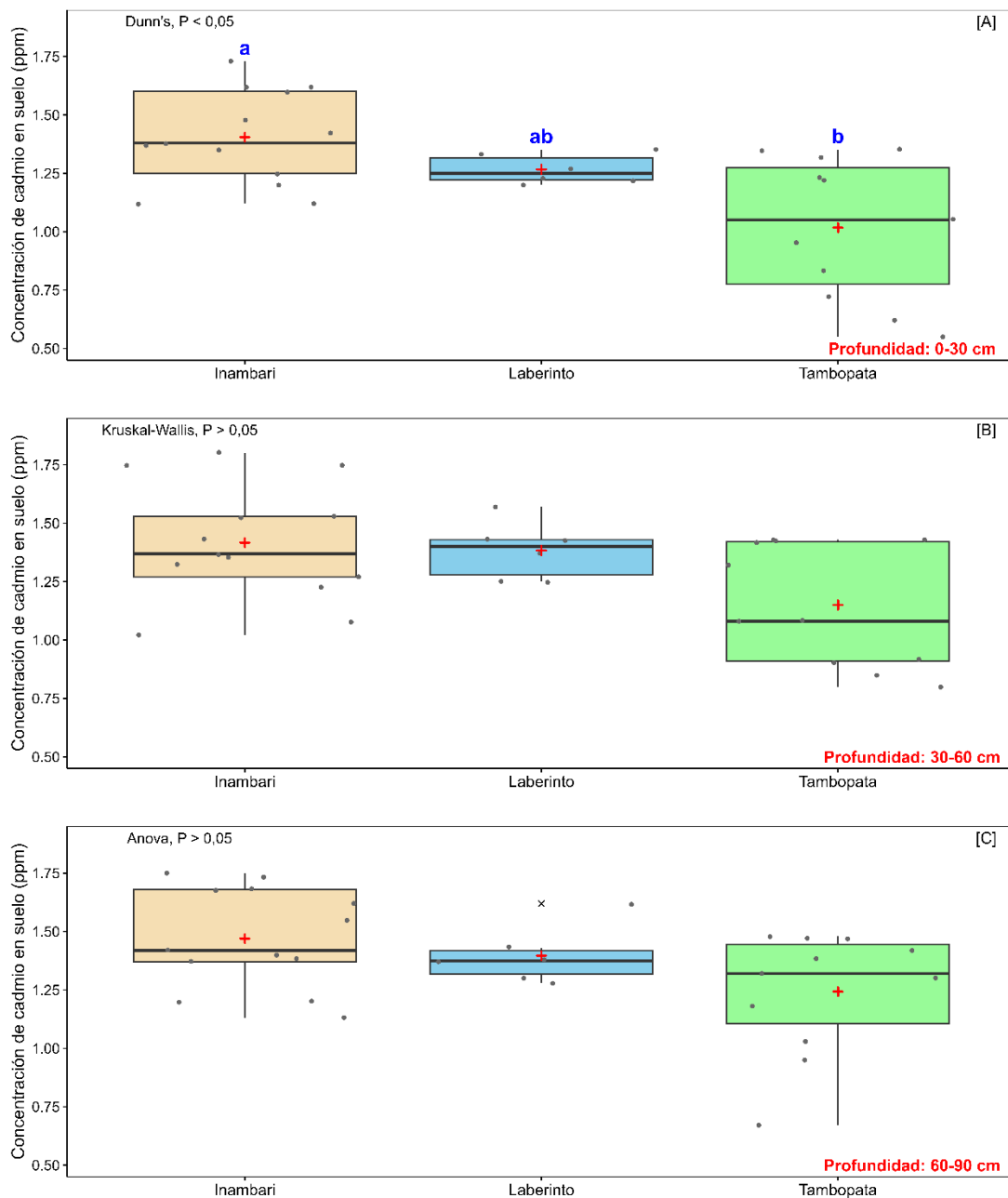


Figura 10. Concentración de cadmio en suelos en tres distritos de Madre de Dios. [A] representa la concentración de cadmio a partir de 0 – 30 cm de profundidad de suelo. [B] concentración de cadmio a partir de 30 – 60 cm de profundidad. [C] concentración de cadmio a partir de 60 -90 cm de profundidad del suelo. El símbolo de cruz de color rojo representa el promedio de los distritos.

En la figura 10A se observa diferencias significativas entre los distritos. El distrito Inambari tuvo mayor concentración de Cd en el suelo a profundidad de 0 a 30 cm siendo similar con el distrito de Laberinto y estadísticamente diferente al distrito de Tambopata. Asimismo, este último distrito presento menor concentración de cadmio que los demás distritos (Tabla 4).

En la figura 1B y 1C, no se evidenciaron diferencias significativas. A profundidad de 30 a 60 cm del suelo el distrito que presenta mayor concentración de cadmio es Laberinto y la menor concentración fue el distrito de Tambopata. A profundidad de 60 a 90 cm del suelo el distrito con mayor concentración de cadmio fue Inambari mientras el distrito de Tambopata tuvo la menor concentración (Tabla 2). El nivel de concentración de cd a diferentes profundidades tienden a aumentar a mayores profundidades, este patrón de incremento difiere de los reportado por Rodríguez, Darghan y Henao (2019) para Colombia. Sin embargo se encontró tendencias de incrementos de cd similares en los estudios reportados por Martínez et al. (2001); Buccolieri et al. (2010); Caridad-Cancela, Paz-González y de Abreu (2005). Los valores promedios de Cd en Colombia (7,48 ppm) son superiores en comparación a los tres distritos estudiados. Asimismo, en Bagua (Perú) Oliva et al. (2020) reportan valores mínimos de 1,02 y máximos de 3,54 mg/kg siendo similares al promedio de Cd en el suelo en los tres distritos.

Las altas concentraciones de cd en suelos puede deberse a fuentes geológicas de contaminación o por actividades antropogénicas (Chaney 2010 ; Kabata-Pendias 2000). Esto concuerda con el presente estudio, debido a que los sistemas agroforestales con cacao son manejados con agroquímicos. Esto debido a que muchas de las plantaciones con asociación de cacao usan fertilizantes a base de fosfatos que pueden alcanzar altos contenidos de cadmio de hasta 130 mg/kg (Chen, Chang y Wu 2007 ; Jiao et al. 2012).

Estos valores promedios de cd en suelos no superan los límites tolerables para suelos agrícolas ($\geq 1,4$ mg/kg) (Luis-Alaya et al. 2023 ; Gamboa 2019). Pero para la United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2002) el nivel crítico es de 0,43 mg/kg. Mientras que para Brasil el límite crítico es

de 0,5 mg/kg (Fadigas et al. 2006). Mientras que otros autores informan un umbral superior a 1 mg/kg de Cd total (Tóth et al. 2016).

Los promedios para los tres distritos a diferentes profundidades superan el límite máximo permitidos por la USEPA (0,43 ppm) siendo este la entidad más estricta establecida hasta el momento para el suelo agrícola (Florida 2021). Por lo tanto, los registros en los tres distritos se categorizan como suelos contaminados por cadmio (Tabla 4).

Tabla 4. Estadística descriptiva de concentración de cadmio en suelos (ppm) en los tres distritos de estudio.

Profundidad del suelo	Distritos	Promedio	SD	Mediana	Mínimo	Máximo
0 – 30 cm	Inambari	1,40	0,20	1,38	1,12	1,73
0 – 30 cm	Laberinto	1,27	0,06	1,25	1,20	1,35
0 – 30 cm	Tambopata	1,02	0,30	1,05	0,55	1,35
	Total	1,24	0,28	1,26	0,55	1,73
30 – 60 cm	Inambari	1,42	0,25	1,37	1,02	1,8
30 – 60 cm	Laberinto	1,38	0,12	1,40	1,25	1,57
30 – 60 cm	Tambopata	1,15	0,26	1,08	0,80	1,43
	Total	1,31	0,26	1,36	0,8	1,8
60 – 90 cm	Inambari	1,47	0,21	1,42	1,13	1,75
60 – 90 cm	Laberinto	1,40	0,12	1,38	1,28	1,62
60 – 90 cm	Tambopata	1,24	0,26	1,32	0,67	1,48
	Total	1,37	0,24	1,38	0,67	1,75

SD = Desviación estándar. Se elaboro con la base de datos del anexo 2.

La concentración de Cd en el suelo a diferentes profundidades son superiores a los reportados por Huauya y Huamaní (2014) para la región de Huánuco. La concentración de Cd en el presente estudio para las tres profundidades fueron 2,34, 2,47 y 2,57 veces mayor que los cultivos de cacao con manejo orgánico reportado por Huauya y Huamaní (2014). Mientras que en la región de San Martín, Mendoza-López et al. (2021) reportaron promedios menores de $0,30 \pm 0,05$ de concentración de cd en suelos en comparación al presente estudio. Sin embargo se reporta para los distritos de San Martín y Huicungo concentraciones de Cd similares a los resultados del presente estudio (García Ríos 2019 ; Quintero 2020) bajo similar manejo de plantaciones de cacao. Por otra parte en Ecuador Argüello et al. (2019) reportan Cd total del suelo promedio de 0,44 ppm inferiores a los tres distritos de estudio. Asimismo, indican que estos valores de Cd son típicos de suelos jóvenes y no

contaminados. Por otra parte, Thomas et al. (2023) indican que las concentraciones elevadas de cadmio en suelos y granos de cacao están restringidas en gran medida a las zonas norteñas del país.

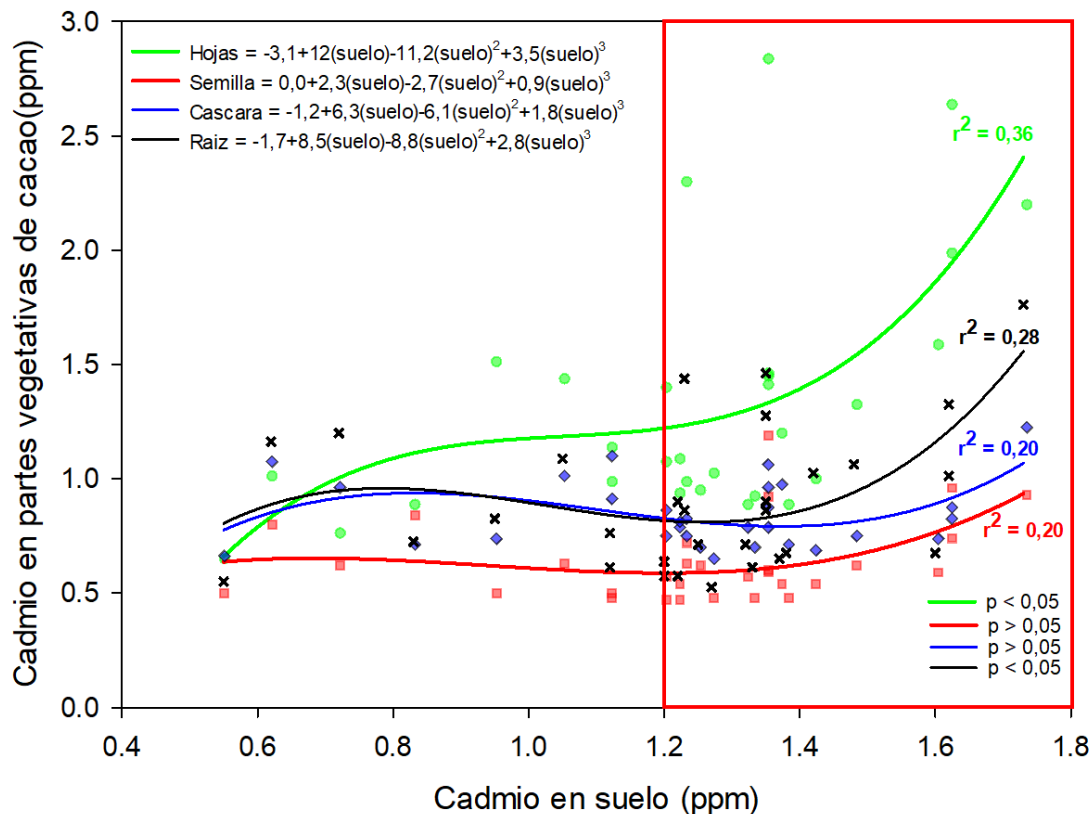


Figura 11. Gráfico de dispersión y líneas de regresión ajustados para el nivel de cadmio a profundidad de 0 a 30 cm del suelo según el nivel de cadmio de las partes vegetativas.

El mejor ajuste en la concentración de cadmio en las hojas de cacao a profundidad de 30 - 60 cm y 0 - 30 cm del suelo fue el modelo cubico ($R^2 = 46\%$ y $R^2 = 36\%$ respectivamente) (Figura 11 y 12). Esta regresión no lineal nos indica que la concentración de cadmio en las hojas de cacao aumenta significativamente a medida que la concentración de cadmio en el suelo se incrementa. Para ambas profundidades de suelo el aumento más notorio ocurre a partir de 1,2 ppm de cadmio en el suelo y alcanza la mayor concentración de cd en hojas a concentraciones de 1,7 ppm de cd del suelo.

Los modelos de mejor ajuste para la concentración de cadmio en la raíz fueron cubico y cuadrático ($> R^2$) según las profundidades del suelo. El modelo cubico presento un $R^2 = 28\%$ a profundidad de 0 - 30 cm del suelo siendo valores de R^2 superiores a las demás profundidades de suelo.

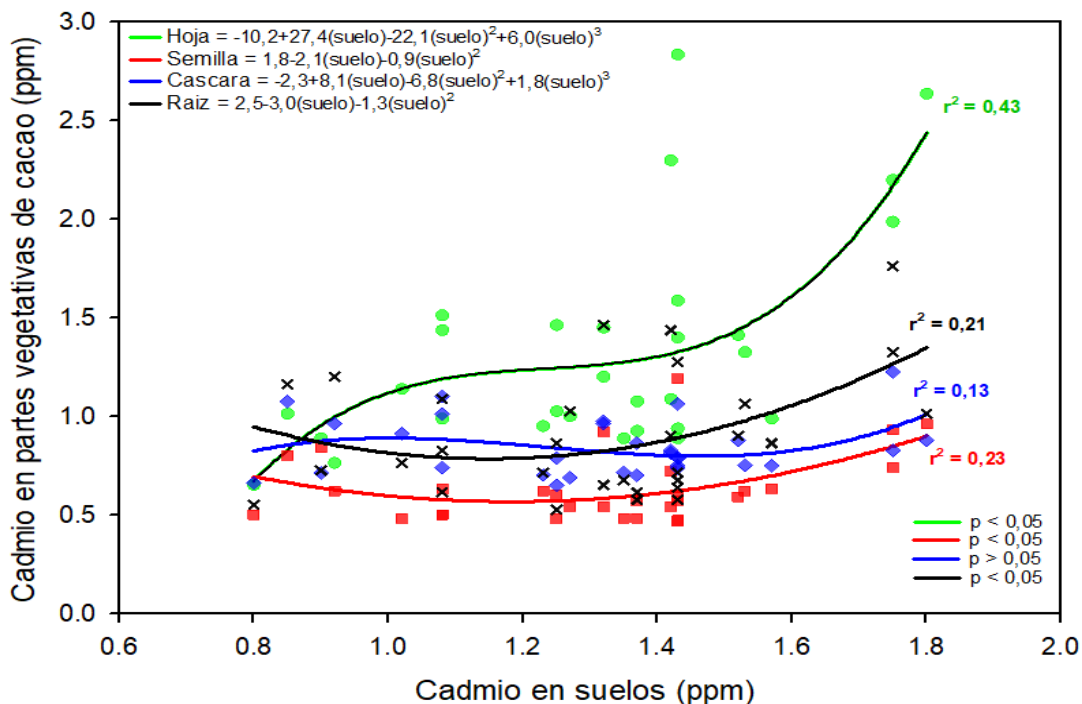


Figura 12. Gráfico de dispersión y líneas de regresión ajustados de nivel de cadmio a profundidad de 30 a 60 cm del suelo según el nivel de cadmio de las partes vegetativas.

En general el modelo de mejor ajuste para los órganos vegetativos de cacao fue el cubico en los tres niveles de profundidad del suelo (Figura 11,12 y 13).

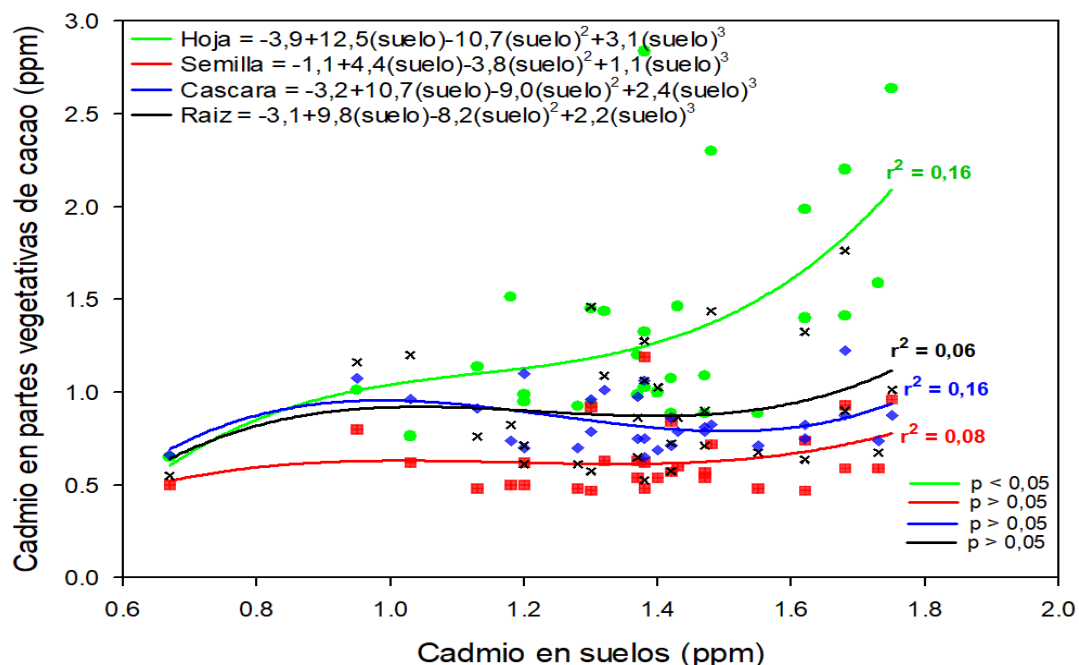


Figura 13. Gráfico de dispersión y líneas de regresión ajustados de nivel de cadmio a profundidad de 60 a 90 cm del suelo según el nivel de cadmio de las partes vegetativas.

A excepción de la concentración de cd en el órgano vegetativo de semilla a profundidad de 30 – 60 cm del suelo que se ajustó mejor a un modelo cuadrático ($R^2 = 23\%$).

CONCLUSIONES

- Se encontró mayores valores de concentración de cd en hojas en comparación con los demás órganos vegetativos de cacao. El distrito que presento mayor concentración de cadmio en las hojas fue Inambari. El distrito con mayor promedio en concentración de cascara, semilla y cascara de cacao fue Tambopata. Las localidades con mayor similitud en concentración de cadmio en los órganos vegetativos fueron Santo domingo y florida alta. Las localidades con mayor concentración de cadmio en las semillas fueron 14 de las 30 muestreadas en el estudio. Los clones CCN51/VRAE99, VRAE99, CCN51/ICS95, CCN51/VRAE15, VRAE15 y CCN51 superaron el límite máximo permitido por la Unión Europea (0,6 mg/kg).
- Los mayores promedios de cadmio en los suelos fueron a mayores profundidades. Los tres distritos presentaron concentraciones de cadmio en suelos superiores a los límites máximos permitidos por la United States Environmental Protection Agency (0,43 ppm), categorizándose como suelos contaminados por cadmio. El distrito con mayor concentración de cadmio en el suelo a diferentes profundidades de muestreo fue Inambari.

SUGERENCIAS

- Se sugiere considerar la altitud (m) como una covariable o una variable de interés para observar variaciones en la concentración de cadmio en distintas zonas del departamento de Madre de Dios. Asimismo, considerar la época de muestreo con la finalidad de observar de qué manera influye en la concentración de Cadmio en el suelo y la bioacumulación en los órganos vegetativos.
- Se sugiere implementar medidas de mitigación en los sistemas agroforestales de las localidades de estudio, con la finalidad de reducir los niveles de cadmio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARÉVALO-GARDINI, E., ARÉVALO-HERNÁNDEZ, C.O., BALIGAR, V.C. y 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* [en línea], vol. 605-606, pp. 792-800. ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.06.122. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717315267>.
- ARGÜELLO, D., CHAVEZ, E., LAURYSSSEN, F., VANDERSCHUEREN, R., SMOLDERS, E. y MONTALVO, D., 2019. Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 649, pp. 120-127. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.08.292. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>.
- BEG, M.S., AHMAD, S., JAN, K. y BASHIR, K., 2017. Status, supply chain and processing of cocoa - A review. *Trends in Food Science and Technology*, vol. 66, pp. 108-116. ISSN 09242244. DOI 10.1016/j.tifs.2017.06.007.
- BUCCOLIERI, A., BUCCOLIERI, G., DELL'ATTI, A., STRISCIULLO, G. y GAGLIANO-CANDELA, R., 2010. Monitoring of total and bioavailable heavy metals concentration in agricultural soils. *Environmental Monitoring and Assessment* [en línea], vol. 168, no. 1-4, pp. 547-560. ISSN 0167-6369. DOI 10.1007/s10661-009-1133-0. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-009-1133-0>.
- CARIDAD-CANCELA, R., PAZ-GONZÁLEZ, A. y DE ABREU, C.A., 2005. Total and Extractable Nickel and Cadmium Contents in Natural Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* [en línea], vol. 36, no. 1-3, pp. 241-252. ISSN 0010-3624. DOI 10.1081/CSS-200043057. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/CSS-200043057>.
- CHANEY, R.L., 2010. Cadmium and zinc. *Trace elements in soils*, pp. 409-439.

- CHAVEZ, E., HE, Z.L., STOFFELLA, P.J., MYLAVARAPU, R.S., LI, Y.C., MOYANO, B. y BALIGAR, V.C., 2015. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, vol. 533, pp. 205-214. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2015.06.106.
- CHEN, W., CHANG, A.C. y WU, L., 2007. Assessing long-term environmental risks of trace elements in phosphate fertilizers. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea], vol. 67, no. 1, pp. 48-58. ISSN 01476513. DOI 10.1016/j.ecoenv.2006.12.013. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0147651306002703>.
- CINAR, Z.Ö., ATANASSOVA, M., TUMER, T.B., CARUSO, G., ANTIKA, G., SHARMA, S., SHARIFI-RAD, J. y PEZZANI, R., 2021. Cocoa and cocoa bean shells role in human health: An updated review. *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 103, no. January. ISSN 08891575. DOI 10.1016/j.jfca.2021.104115.
- CLEMENS, S., 2019. Safer food through plant science: reducing toxic element accumulation in crops. *Journal of Experimental Botany*, vol. 70, pp. 5537-5557. DOI 10.1093/jxb/erz366.
- CLEMENS, S. y MA, J.F., 2016. Toxic Heavy Metal and Metalloid Accumulation in Crop Plants and Foods. *Annual Review of Plant Biology*, vol. 67, no. January, pp. 489-512. ISSN 15452123. DOI 10.1146/annurev-arplant-043015-112301.
- DE SOUZA, P.A., MOREIRA, L.F., SARMENTO, D.H.A. y DA COSTA, F.B., 2018. Cacao—*Theobroma cacao*. *Exotic Fruits Reference Guide*, vol. 3, no. 2001, pp. 69-76. DOI 10.1016/B978-0-12-803138-4.00010-1.
- DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, 2014. REGLAMENTO (UE) No 488/2014 DE LA COMISIÓN de 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en. *EFSA Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 10-14. ISSN 18314732. DOI 10.2903/j.efsa.2011.1975.
- EFSA (EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY), 2012. Cadmium dietary

exposure in the European population. *EFSA Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1-37. ISSN 18314732. DOI 10.2903/j.efsa.2012.2551.

ENGBERSEN, N., GRAMLICH, A., LOPEZ, M., SCHWARZ, G., HATTENDORF, B., GUTIERREZ, O. y SCHULIN, R., 2019. Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of the Total Environment*, vol. 678, pp. 660-670. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.05.001.

FADIGAS, F. de S., SOBRINHO, N.M.B. do A., MAZUR, N. y CUNHA DOS ANJOS, L.H., 2006. Estimation of Reference Values for Cadmium, Cobalt, Chromium, Copper, Nickel, Lead, and Zinc in Brazilian Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* [en línea], vol. 37, no. 7-8, pp. 945-959. ISSN 0010-3624. DOI 10.1080/00103620600583885. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103620600583885>.

FLORIDA, N., 2021. Cadmio en suelos y granos de cacao de origen peruano y sudamericano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 74, no. 2, pp. 9499-9515. ISSN 22487026.

GAMBOA, N., 2019. El Cadmio, ¿su presencia nos alerta de la contaminación antropogénica? *Revista de Química PUCP* [en línea], vol. 33, pp. 1-2. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/quimica>.

GARCÍA RIOS, J.N., 2019. Comparación de la concentración de Cadmio en Plantaciones de Cacao en los distritos de Huicungo y San Martín de Alao - 2018. *Comparación de la concentración de Cadmio en Plantaciones de Cacao en los distritos de Huicungo y San Martín de Alao - 2018*, vol. 0, no. 0, pp. 1-77.

GESTIÓN, 2021. Midagri: producción de cacao crece a 14% anual hace una década. *Gestión*,

GRAMLICH, A., TANDY, S., ANDRES, C., CHINCHEROS PANIAGUA, J., ARMENGOT, L., SCHNEIDER, M. y SCHULIN, R., 2017. Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of the Total*

Environment, vol. 580, pp. 677-686. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.12.014.

GRAMLICH, A., TANDY, S., GAUGGEL, C., LÓPEZ, M., PERLA, D., GONZALEZ, V. y SCHULIN, R., 2018. Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment* [en línea], vol. 612, pp. 370-378. ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.08.145.

Disponible en:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717321411>.

HUAUYA, M. y HUAMANÍ, Hu., 2014. Edaphic Macrofauna and Heavy Metals in the Cacao Crop, *Theobroma Cacao* L. (Malvaceae). *The Biologist*, vol. 12, no. 1, pp. 45-55. ISSN 1816-0719.

ICCO (INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION), 2021. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. .

JIAO, W., CHEN, W., CHANG, A.C. y PAGE, A.L., 2012. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review. *Environmental Pollution* [en línea], vol. 168, pp. 44-53. ISSN 02697491. DOI 10.1016/j.envpol.2012.03.052. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749112001923>.

KABATA-PENDIAS, A., 2000. *Trace elements in soils and plants*. S.I.: CRC press. ISBN 042919112X.

KIM, J., LEE, K.W. y LEE, H.J., 2011. Cocoa (*Theobroma cacao*) Seeds and Phytochemicals in Human Health. *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*, pp. 351-360. DOI 10.1016/B978-0-12-375688-6.10042-8.

KUBIER, A., WILKIN, R.T. y PICHLER, T., 2019. Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, vol. 108, pp. 104388. ISSN 18729134. DOI 10.1016/j.apgeochem.2019.104388.

LLATANCE, W.O., GONZA SAAVEDRA, C.J., GUZMÁN CASTILLO, W. y PARIENTE MONDRAGÓN, E., 2018. Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, vol. 33, no. 1, pp. 63. ISSN 0556-6592. DOI

10.21704/rfp.v33i1.1156.

- LOPEZ, J.A. y HOYOS, J., 2018. Determinación del contenido de Cadmio (Cd) en almendras de Cacao (*Theobroma cacao* L) cultivado bajo tres sistemas de manejo en San Alejandro-region Ucayali. *Universidad Nacional de Ucayali* [en línea], no. Cd, pp. 1-11. Disponible en: <http://181.176.160.68/handle/UNU/3926>.
- LUIS-ALAYA, B., TORO, M., CALSINA, R., OGATA-GUTIÉRREZ, K., GIL-POLO, A., ORMEÑO-ORRILLO, E. y ZÚÑIGA-DÁVILA, D., 2023. Evaluation of the Presence of Arbuscular Mycorrhizae and Cadmium Content in the Plants and Soils of Cocoa Plantations in San Martin, Peru. *Diversity*, vol. 15, no. 2. ISSN 14242818. DOI 10.3390/d15020246.
- MARTÍNEZ, M.J., MORENO-GRAU, S., MARTÍNEZ GARCÍA, J.J., MORENO, J., BAYO, J., GUILLÉN, J.J. y MORENO-CLAVEL, J., 2001. Distribution of the metals lead, cadmium, copper, and zinc in the top soil of Cartagena, Spain. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 131, no. 1-4, pp. 329-347. ISSN 00496979. DOI 10.1023/A:1011916218755.
- MAXIMOVA, S.N., LOCK, T.C. y GUILTINAN, M.J., 2008. Cocoa. *Compendium of Transgenic Crop Plants*, pp. 85-98.
- MENDOZA-LÓPEZ, K.L., MOSTACERO-LEÓN, J., LÓPEZ-MEDINA, S.E., EFRAÍN GIL-RIVERO, A., DE LA CRUZ-CASTILLO, A.J. y VILLENA-ZAPATA, L., 2021. Cadmium in *Theobroma cacao* L. "cacao" plantations in the San Martin region (Lamas), Peru. *Manglar*, vol. 18, no. 2, pp. 169-173. DOI 10.17268/manglar.2021.022.
- METER, A., ATKINSON, R. y LABIBERTE, B., 2019. *Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe: Análisis de la Investigación y Soluciones Potenciales para la Mitigación* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796. Disponible en: <https://bit.ly/3wfTpY1>.
- METER, A., ATKINSON, R. y LALIBERTE, B., 2019. *Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe*. S.l.: s.n. ISBN 9789292551360.
- MINAGRI (MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO), 2022. Perfil productivo y competitivo de los principales cultivos del sector. .

- MINAM, 2017. DECRETO SUPREMO N° 011-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos. . S.l.:
- MINAM (MINISTERIO DEL AMBIENTE), 2014. Guía para el Muestreo de Suelos. *Ministerio del Ambiente*, pp. 72.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE (MINAM), 2013. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Decreto Supremo DS N° 002-2013-MINAM. *El Peruano*. Lima, Perú: MINAM.
- MOTAMAYOR, J.C., RISTERUCCI, A.M., LOPEZ, P.A., ORTIZ, C.F., MORENO, A. y LANAUD, C., 2002. Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, vol. 89, no. 5, pp. 380-386. ISSN 0018067X. DOI 10.1038/sj.hdy.6800156.
- OLIVA, M., RUBIO, K., EPQUIN, M., MARLO, G. y LEIVA, S., 2020. Cadmium uptake in native cacao trees in agricultural lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, vol. 10, no. 10. ISSN 20734395. DOI 10.3390/agronomy10101551.
- PHILLIPS-MORA, W. y BEKELE, F., 2019. Cacao (*Theobroma cacao* L.) Breeding. *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops*, vol. 6, no. October 2019, pp. 1-744. DOI 10.1007/978-3-030-23265-8.
- QUINTERO, E., 2020. *Determinación de las condiciones del suelo de dos cultivos de cacao y su relación con la biodisponibilidad y absorción de Cadmio*. S.l.: Tesis de pregrado.
- RAI, P.K., LEE, S.S., ZHANG, M., TSANG, Y.F. y KIM, K.H., 2019. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, vol. 125, no. January, pp. 365-385. ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2019.01.067.
- RODRÍGUEZ, H.S., DARGHAN, A.E. y HENAO, M.C., 2019. Spatial regression modeling of soils with high cadmium content in a cocoa producing area of Central Colombia. *Geoderma Regional* [en línea], vol. 16, pp. e00214. ISSN 23520094. DOI 10.1016/j.geodrs.2019.e00214. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00214>.

- ROFNER, N., 2021. Revisión sobre límites máximos de cadmio en Cacao (*Theobroma Cacao L.*). *La granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 34, no. 488, pp. 117-130. DOI <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>.
- SHAHBANDEH, M., 2021. Cocoa bean production worldwide 2020/2021-2022/2023, by country. .
- THOMAS, E., ATKINSON, R., ZAVALETA, D., RODRIGUEZ, C., LASTRA, S., YOVERA, F., ARANGO, K., PEZO, A., AGUILAR, J., TAMES, M., RAMOS, A., CRUZ, W., COSME, R., ESPINOZA, E., CHAVEZ, C.R. y LADD, B., 2023. The distribution of cadmium in soil and cacao beans in Peru. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 881, no. December 2022, pp. 163372. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163372. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163372>.
- TÓTH, G., HERMANN, T., DA SILVA, M.R. y MONTANARELLA, L., 2016. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International* [en línea], vol. 88, pp. 299-309. ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2015.12.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>.
- TUESTA, F., 2022. *Bioacumulación del Cadmio (Cd) en plantaciones de Cacao (Theobroma cacao L.) asociadas a la cooperativa aprocam en la región Amazonas*. Chachapoyas: Tesis de Pre-grado.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 2002. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites. *United States Environ. Prot. Agency*, vol. 12, pp. 1-187.
- VANDERSCHUEREN, R., ARGÜELLO, D., BLOMMAERT, H., MONTALVO, D., BARRAZA, F., MAURICE, L., SCHRECK, E., SCHULIN, R., LEWIS, C., VAZQUEZ, J.L., UMAHARAN, P., CHAVEZ, E., SARRET, G. y SMOLDERS, E., 2021. Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of the Total Environment*, vol. 781, pp. 146779. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.146779.

ZHAO, F.J., TANG, Z., SONG, J.J., HUANG, X.Y. y WANG, P., 2022. Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. *Molecular Plant*, vol. 15, no. 1, pp. 27-44. ISSN 17529867. DOI 10.1016/j.molp.2021.09.016.

ZUG, K.L.M., HUAMANÍ YUPANQUI, H.A., MEYBERG, F., CIERJACKS, J.S. y CIERJACKS, A., 2019. Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 230, no. 3, pp. 1-18. ISSN 15732932. DOI 10.1007/s11270-019-4109-x.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema de estudio	Objetivos	Hipótesis	Variabes	Indicadores
<p>¿Cuáles son los niveles de cadmio de cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios?</p>	<p>Objetivo general:</p> <p>-Evaluar los niveles de cadmio en sistemas agroforestales con cacao en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios</p> <p>Objetivos específicos:</p> <p>-Evaluar los niveles de cadmio en los suelos con sistemas agroforestales de cacao en tres distritos de Tambopata en la región Madre de Dios.</p> <p>-Evaluar la bioacumulación de cadmio en las diferentes partes vegetativas del cacao (raíz, hoja, semilla y cáscara) establecido en sistemas agroforestales en tres distritos de Tambopata en la región Madre de Dios</p>	<p>H0: Los niveles de cadmio en el suelo no influye en los niveles de cadmio en el cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios.</p> <p>H1: Los niveles de cadmio en el suelo influye en los niveles de cadmio en el cacao en sistemas agroforestales en tres distritos de la provincia Tambopata en la región Madre de Dios.</p>	<p>Independiente: Niveles de cadmio en el suelo</p> <p>Dependientes: Niveles de cadmio en el cacao</p>	<p>Independiente</p> <p>-Parcelas agrícolas</p> <p>-Profundidad del suelo (0-30, 30-60 y 60-90 cm).</p> <p>Dependientes</p> <p>-Contenido de cadmio en la raíz.</p> <p>-Contenido de cadmio en la hoja.</p> <p>-Contenido de cadmio en la cascara.</p> <p>-Contenido de cadmio en la semilla.</p>

Anexo 2. Base de datos de estudio.

Distrito	Localidad	Edad	Clon	Prof_soil_cod	Suelo	Hoja	Semilla	Cascara	Raiz
Inambari	Centromin	6	CCN51	30 - 60 cm	1.75	2.20	0.93	1.23	1.76
Inambari	Centromin	6	CCN51	60 - 90 cm	1.68	2.20	0.93	1.23	1.76
Inambari	Centromin	6	CCN51	0 - 30 cm	1.73	2.20	0.93	1.23	1.76
Inambari	Dos de mayo	6	CCN51	30 - 60 cm	1.53	1.33	0.62	0.75	1.06
Inambari	Dos de mayo	6	CCN51	60 - 90 cm	1.38	1.33	0.62	0.75	1.06
Inambari	Dos de mayo	6	CCN51	0 - 30 cm	1.48	1.33	0.62	0.75	1.06
Inambari	El progreso	6	CCN51	0 - 30 cm	1.12	0.99	0.50	1.10	0.61
Inambari	El progreso	6	CCN51	60 - 90 cm	1.20	0.99	0.50	1.10	0.61
Inambari	El progreso	6	CCN51	30 - 60 cm	1.08	0.99	0.50	1.10	0.61
Inambari	Florida alta	7	CCN51	0 - 30 cm	1.38	0.89	0.48	0.71	0.68
Inambari	Florida alta	7	CCN51	60 - 90 cm	1.55	0.89	0.48	0.71	0.68
Inambari	Florida alta	7	CCN51	30 - 60 cm	1.35	0.89	0.48	0.71	0.68
Inambari	Puerto carlos	6	CCN51	0 - 30 cm	1.60	1.59	0.59	0.74	0.68
Inambari	Puerto carlos	6	CCN51	60 - 90 cm	1.73	1.59	0.59	0.74	0.68
Inambari	Puerto carlos	6	CCN51	30 - 60 cm	1.43	1.59	0.59	0.74	0.68
Inambari	Puerto trujillo	6	VRAE99	0 - 30 cm	1.62	2.64	0.96	0.88	1.01
Inambari	Puerto trujillo	6	VRAE99	30 - 60 cm	1.80	2.64	0.96	0.88	1.01
Inambari	Puerto trujillo	6	VRAE99	60 - 90 cm	1.75	2.64	0.96	0.88	1.01
Inambari	San juan	5	CCN51	0 - 30 cm	1.35	1.41	0.59	0.88	0.90
Inambari	San juan	5	CCN51	60 - 90 cm	1.68	1.41	0.59	0.88	0.90
Inambari	San juan	5	CCN51	30 - 60 cm	1.52	1.41	0.59	0.88	0.90
Inambari	San juan II	5	CHUNCHO	0 - 30 cm	1.25	0.95	0.62	0.70	0.71
Inambari	San juan II	5	CHUNCHO	30 - 60 cm	1.23	0.95	0.62	0.70	0.71
Inambari	San juan II	5	CHUNCHO	60 - 90 cm	1.20	0.95	0.62	0.70	0.71
Inambari	San vicente	6	CCN51	0 - 30 cm	1.20	1.08	0.57	0.86	0.58
Inambari	San vicente	6	CCN51	60 - 90 cm	1.42	1.08	0.57	0.86	0.58
Inambari	San vicente	6	CCN51	30 - 60 cm	1.37	1.08	0.57	0.86	0.58
Inambari	Santa rita alta	5	VRAE15/VRAE99	0 - 30 cm	1.37	1.20	0.54	0.98	0.65
Inambari	Santa rita alta	5	VRAE15/VRAE99	60 - 90 cm	1.37	1.20	0.54	0.98	0.65
Inambari	Santa rita alta	5	VRAE15/VRAE99	30 - 60 cm	1.32	1.20	0.54	0.98	0.65
Inambari	Santa rosa	10	CCN51	0 - 30 cm	1.62	1.99	0.74	0.83	1.33
Inambari	Santa rosa	10	CCN51	30 - 60 cm	1.75	1.99	0.74	0.83	1.33
Inambari	Santa rosa	10	CCN51	60 - 90 cm	1.62	1.99	0.74	0.83	1.33
Inambari	Sol naciente	6	VRAE15/VRAE99/CCN51	0 - 30 cm	1.12	1.14	0.48	0.91	0.76
Inambari	Sol naciente	6	VRAE15/VRAE99/CCN51	60 - 90 cm	1.13	1.14	0.48	0.91	0.76
Inambari	Sol naciente	6	VRAE15/VRAE99/CCN51	30 - 60 cm	1.02	1.14	0.48	0.91	0.76
Inambari	Virgenes del sol	8	CCN51	0 - 30 cm	1.42	1.00	0.54	0.69	1.03
Inambari	Virgenes del sol	8	CCN51	60 - 90 cm	1.40	1.00	0.54	0.69	1.03
Inambari	Virgenes del sol	8	CCN51	30 - 60 cm	1.27	1.00	0.54	0.69	1.03

Continuación de Anexo 2. Base de datos de estudio.

Distrito	Localidad	Edad	Clon	Prof_soil_cod	Suelo	Hoja	Semilla	Cascara	Raiz
Laberinto	Florida baja	6	VRAE15/VRAE99/CCN51	60 - 90 cm	1.38	1.03	0.48	0.65	0.53
Laberinto	Florida baja	6	VRAE15/VRAE99/CCN51	30 - 60 cm	1.25	1.03	0.48	0.65	0.53
Laberinto	Florida baja	6	VRAE15/VRAE99/CCN51	0 - 30 cm	1.27	1.03	0.48	0.65	0.53
Laberinto	Las mercedes	6	ICS39/TSH565	60 - 90 cm	1.43	1.46	0.60	0.79	0.86
Laberinto	Las mercedes	6	ICS39/TSH565	30 - 60 cm	1.25	1.46	0.60	0.79	0.86
Laberinto	Las mercedes	6	ICS39/TSH565	0 - 30 cm	1.35	1.46	0.60	0.79	0.86
Laberinto	Santo domingo	6	CCN51	0 - 30 cm	1.33	0.93	0.48	0.70	0.61
Laberinto	Santo domingo	6	CCN51	30 - 60 cm	1.37	0.93	0.48	0.70	0.61
Laberinto	Santo domingo	6	CCN51	60 - 90 cm	1.28	0.93	0.48	0.70	0.61
Laberinto	Santo domingo_2	6	CCN51	0 - 30 cm	1.22	0.94	0.47	0.79	0.58
Laberinto	Santo domingo_2	6	CCN51	30 - 60 cm	1.43	0.94	0.47	0.79	0.58
Laberinto	Santo domingo_2	6	CCN51	60 - 90 cm	1.30	0.94	0.47	0.79	0.58
Laberinto	Tahuantinsuyo	5	CCN51/ICS95	0 - 30 cm	1.23	0.99	0.63	0.75	0.86
Laberinto	Tahuantinsuyo	5	CCN51/ICS95	30 - 60 cm	1.57	0.99	0.63	0.75	0.86
Laberinto	Tahuantinsuyo	5	CCN51/ICS95	60 - 90 cm	1.37	0.99	0.63	0.75	0.86
Laberinto	Victor raul	5	CCN51/CRIOLLO	0 - 30 cm	1.20	1.40	0.47	0.75	0.64
Laberinto	Victor raul	5	CCN51/CRIOLLO	60 - 90 cm	1.62	1.40	0.47	0.75	0.64
Laberinto	Victor raul	5	CCN51/CRIOLLO	30 - 60 cm	1.43	1.40	0.47	0.75	0.64
Tambopata	Alta cachuela	5	CCN51	60 - 90 cm	0.95	1.01	0.80	1.08	1.16
Tambopata	Alta cachuela	5	CCN51	30 - 60 cm	0.85	1.01	0.80	1.08	1.16
Tambopata	Alta cachuela	5	CCN51	0 - 30 cm	0.62	1.01	0.80	1.08	1.16
Tambopata	Alta cachuela_2	5	VRAE15	60 - 90 cm	1.03	0.76	0.62	0.96	1.20
Tambopata	Alta cachuela_2	5	VRAE15	30 - 60 cm	0.92	0.76	0.62	0.96	1.20
Tambopata	Alta cachuela_2	5	VRAE15	0 - 30 cm	0.72	0.76	0.62	0.96	1.20
Tambopata	Cachuela	8	CHUNCHO	30 - 60 cm	1.32	1.45	0.92	0.96	1.46
Tambopata	Cachuela	8	CHUNCHO	60 - 90 cm	1.30	1.45	0.92	0.96	1.46
Tambopata	Cachuela	8	CHUNCHO	0 - 30 cm	1.35	1.45	0.92	0.96	1.46
Tambopata	Chonta	8	CCN51/VRAE99	30 - 60 cm	1.43	2.84	1.19	1.06	1.28
Tambopata	Chonta	8	CCN51/VRAE99	60 - 90 cm	1.38	2.84	1.19	1.06	1.28
Tambopata	Chonta	8	CCN51/VRAE99	0 - 30 cm	1.35	2.84	1.19	1.06	1.28
Tambopata	Chorrillos	7	CCN51/VRAE99	60 - 90 cm	1.32	1.44	0.63	1.01	1.09
Tambopata	Chorrillos	7	CCN51/VRAE99	30 - 60 cm	1.08	1.44	0.63	1.01	1.09
Tambopata	Chorrillos	7	CCN51/VRAE99	0 - 30 cm	1.05	1.44	0.63	1.01	1.09
Tambopata	Isuyama	5	VRAE15	60 - 90 cm	1.48	2.30	0.72	0.83	1.44
Tambopata	Isuyama	5	VRAE15	30 - 60 cm	1.42	2.30	0.72	0.83	1.44
Tambopata	Isuyama	5	VRAE15	0 - 30 cm	1.23	2.30	0.72	0.83	1.44
Tambopata	Montesinai	7	VRAE99	30 - 60 cm	0.80	0.65	0.50	0.66	0.55
Tambopata	Montesinai	7	VRAE99	60 - 90 cm	0.67	0.65	0.50	0.66	0.55
Tambopata	Montesinai	7	VRAE99	0 - 30 cm	0.55	0.65	0.50	0.66	0.55

Continuación de Anexo 2. Base de datos de estudio.

Distrito	Localidad	Edad	Clon	Prof_soil_cod	Suelo	Hoja	Semilla	Cascara	Raiz
Tambopata	Montesinai_2	8	CCN51	60 - 90 cm	1.47	1.09	0.54	0.81	0.90
Tambopata	Montesinai_2	8	CCN51	30 - 60 cm	1.42	1.09	0.54	0.81	0.90
Tambopata	Montesinai_2	8	CCN51	0 - 30 cm	1.22	1.09	0.54	0.81	0.90
Tambopata	San bernardo	5	CCN51/VRAE15	60 - 90 cm	1.42	0.89	0.84	0.71	0.73
Tambopata	San bernardo	5	CCN51/VRAE15	30 - 60 cm	0.90	0.89	0.84	0.71	0.73
Tambopata	San bernardo	5	CCN51/VRAE15	0 - 30 cm	0.83	0.89	0.84	0.71	0.73
Tambopata	Tupac amaru	6	CHUNCHO/CCN51	0 - 30 cm	0.95	1.51	0.50	0.74	0.83
Tambopata	Tupac amaru	6	CHUNCHO/CCN51	60 - 90 cm	1.18	1.51	0.50	0.74	0.83
Tambopata	Tupac amaru	6	CHUNCHO/CCN51	30 - 60 cm	1.08	1.51	0.50	0.74	0.83
Tambopata	Union chonta	5	CCN51	0 - 30 cm	1.32	0.89	0.57	0.79	0.71
Tambopata	Union chonta	5	CCN51	60 - 90 cm	1.47	0.89	0.57	0.79	0.71
Tambopata	Union chonta	5	CCN51	30 - 60 cm	1.43	0.89	0.57	0.79	0.71

Anexo 3. Panel fotográfico del estudio

➤ Fase de campo



Figura 15. Muestreo de suelos a diferentes profundidades.



Figura 14. Muestreo de órganos vegetativos del cacao.

➤ Fase de laboratorio



Figura 16. Preparación de muestras para análisis de cadmio.

